

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
ОДЕСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ ЕКОЛОГІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

О.І. ГЕРАСИМОВ, М.М. ХУДИНЦЕВ, Л.С. КУДАШКІНА

**ФІЗИЧНІ ОСНОВИ ЕЛЕКТРОМАГНІТНОГО ЗАБРУДНЕННЯ  
НАВКОЛИШНЬОГО СЕРЕДОВИЩА**

Навчальний посібник

Одеса  
Одеський державний екологічний університет  
2023

УДК 53.03

Г 37

**Герасимов О.І., Худинцев М.М., Кудашкіна Л.С.**

*Г 37* Фізичні основи електромагнітного забруднення навколишнього середовища: навчальний посібник. Одеса : Одеський державний екологічний університет, 2023. 66 с.

ISBN 978-966-186-275-2

Матеріал посібника відповідає програмі проведення курсів з технології захисту навколишнього середовища і спрямований на формування уявлень про технології захисту елементів навколишнього середовища і надання студентам глибокого розуміння ключових аспектів, пов'язаних із електромагнітними явищами, їх впливом на речовину та способами захисту навколишнього середовища. Посібник надає студентам можливість освоїти різнобічні знання про електромагнітні явища, розглянути важливі поняття рівнянь Максвелла та їх застосування в реальних ситуаціях. Він допомагає розвинути аналітичне мислення, критичне мислення та навички аналізу впливу електромагнітного випромінювання на довкілля та здоров'я людей. Питання, які розглядаються, надають можливість освоїти різноманітні аспекти електромагнітних явищ, від базових теоретичних знань до практичних навичок. Матеріал посібника спрямовано на методичне забезпечення та фахове озброєння фахівців, які за професійною потребою мають бути підготовані до практичних умов функціонування в умовах потенційного електромагнітного опромінення.

**УДК 53.03**

**Рецензенти:**

професор Одеського національного університету ім. І.І. Мечникова, доктор фізико-математичних наук **Калинчак В.В.**

професор Одеського державного екологічного університету, завідувач кафедри хімії навколишнього середовища, доктор технічних наук **Софронков О.Н.**

*Затверджено вченою радою Одеського державного екологічного університету  
Міністерства освіти і науки України як навчальний посібник для здобувачів вищої  
освіти за спеціальністю «Технології захисту навколишнього середовища»  
(протокол №9 від 26. 10. 2023 р.)*

ISBN 978-966-186-275-2

© О.І. Герасимов, 2023

© Одеський державний екологічний університет, 2023

## ЗМІСТ

ПЕРЕДМОВА.....	4
<b>1 Електромагнітне випромінювання.....</b>	<b>8</b>
1.1 Основні відомості про електромагнітне випромінювання .....	8
1.2 Характеристики електромагнітного випромінювання .....	12
1.3 Природні та штучні джерела електромагнітних випромінювань .....	14
1.4 Контрольні запитання до розділу 1.....	19
<b>2 Взаємодія електромагнітного-випромінювання з речовиною .....</b>	<b>20</b>
2.1 Поширення електромагнітних хвиль в середовищах .....	20
2.2 Хвилі на поверхні розділу двох діелектриків .....	22
2.3 Хвилі на поверхні розділу діелектрик – провідник .....	23
2.4 Контрольні запитання до розділу 2.....	24
<b>3 Елементи навколишнього середовища як системи і об'єкти захисту....</b>	<b>25</b>
3.1 Елементи навколишнього середовища – повітря, вода, ґрунт, біологічні системи. Засоби їх захисту .....	25
3.2 Селективність у виборі технологій захисту навколишнього середовища	28
3.3 Захисні екрани.....	38
3.4 Контрольні запитання до розділу 3.....	44
<b>4 Окремі розділи теорії багаточастинкового розсіювання.....</b>	<b>45</b>
4.1 Загальні відомості з теорій розсіювання Борна і Мі. Огляд методів дослідження багаточастинкового розсіювання .....	45
4.2 Формальний опис взаємодії випромінювання із гранульованою речовиною в режимі багатократного розсіяння .....	48
4.2.1 Розкладення плоскої хвилі в термінах координат зсуву .....	48
4.2.2 Розсіяння на окремих сферах .....	51
4.2.3 Вектор трансляційних коефіцієнтів .....	53
4.2.4 Рекурентні формули для коефіцієнтів Гаунта .....	53
4.2.5 Матрична форма запису для амплітуди розсіяння .....	54
4.2.6 Повний і диференціальний переріз розсіяння та параметри асиметрії .	54
4.2.7 Скорочена параметризація розсіяння у гранульованих матеріалах за допомогою теорії Мі .....	59
4.3 Контрольні запитання до розділу 4.....	61
ВИКОРИСТАНІ ДЖЕРЕЛА.....	62
ПРЕДМЕТНИЙ ПОКАЖЧИК .....	65

## ПЕРЕДМОВА

Електромагнітне забруднення – це поширення хвиль, які мають електричну (Е) та магнітну (Н) компоненти поля понад безпечну норму для навколишнього середовища. Вони впливають на клітинному рівні, що призводить до деструктивних змін біологічних організмів.

Всі живі тканини мають магнітні властивості, на які певною мірою впливає наявність електромагнітного випромінювання в навколишньому середовищі. Отже, всі живі істоти, включаючи рослини, мікроби, тварин та людей, є індикаторами впливу електромагнітного випромінювання у навколишньому середовищі. Випромінювання – це процес, з якого енергія поширюється у вигляді хвиль чи частинок через простір.

На планеті спостерігається швидке глобальне поширення штучних електромагнітних полів. Найбільш помітним з них є покрив радіочастотного електромагнітного випромінювання, переважно мікрохвильового, що генерується для технологій бездротового зв'язку. Наукові дані свідчать, що тривалий вплив радіочастотного електромагнітного випромінювання має серйозні біологічні наслідки для здоров'я.

Нормативи опромінення населення в більшості країн, як і раніше, ґрунтуються на рекомендаціях Міжнародної комісії із захисту від неіонізуючого випромінювання, а також Інституту інженерів з електротехніки та радіоелектроніки.

Ці рекомендації було створено ще 1990-х роках з урахуванням переконання, що небезпечні лише гострі термічні впливи. В інших випадках хромосомне ушкодження та інші види деструктивної дії не спостерігаються. Доведено, що запобігання нагріванню тканин радіочастотним електромагнітним випромінюванням є неефективним для запобігання біохімічним та фізіологічним проблемам.

Хромосомне ушкодження – це механізм, що викликає вроджені дефекти та рак. Було виявлено, що тривалий безперервний або щоденний вплив ЕМП (електромагнітного поля), що повторюється, викликає клітинні стресові реакції на нетеплових рівнях потужності, що призводить до накопичення помилок ДНК.

Розглянуте явище – це серйозна проблема з огляду на неухильне зростання захворюваності. Існують докази зв'язку між порушеннями

розвитку нервової системи або поведінкою у дітей та впливом бездротових пристроїв.

Експериментальні дані показують, що пренатальний вплив може викликати структурні та функціональні зміни в мозку, пов'язані з поведінкою, подібною до СДВГ. Ці відомості заслуговують на невідкладну увагу.

Практично доведено, що гостра нетеплова дія змінює:

- метаболізм людського мозку;
- електричну активність у головному мозку;
- системні імунні реакції.

При цьому хронічний вплив пов'язаний з підвищеним окислювальним стресом та пошкодженням ДНК і може стати причиною появи та розвитку онкологічних захворювань.

Безпрецедентний вплив радіочастотного електромагнітного випромінювання на людину з моменту зачаття до смерті спостерігається останні два десятиліття. Докази його на ЦНС включає:

- Порушення розвитку нервової системи;
- Підвищений ризик деяких нейродегенеративних захворювань.

Порівняльні дослідження на тваринах дають цінну інформацію. Існують також свідчення впливу радіочастотного електромагнітного випромінювання на флору та фауну. Вплив електромагнітного випромінювання на рослини та тварин включає:

- зменшення радіального зростання дерев;
- зниження щільності птахів та ссавців: лелек, горобців, кажанів та ін;
- вплив на бджіл та на магнітні механізми орієнтації птахів;
- багато інших ефектів.

Зауважимо, що рослини і тварини можна контролювати як індикатори довкілля з метою оцінки впливу електромагнітного випромінювання.

Наприклад, глобальне скорочення чисельності бджіл та інших комах, що повідомляється, правдоподібно пов'язане зі збільшенням радіочастотного електромагнітного випромінювання в навколишньому середовищі. Медоносні бджоли відносяться до тих видів, які використовують магніторецепцію, чутливу до антропогенних електромагнітних полів для навігації.

У світі спостерігається експоненційне зростання використання бездротових пристроїв особистого зв'язку: мобільних та бездротових

телефонів, пристроїв з підтримкою Wi-Fi та Bluetooth; а також інфраструктури, що забезпечує вплив радіочастотного електромагнітного випромінювання в діапазоні частот 1 ГГц.

Все це в основному призначене для сучасного бездротового зв'язку. При цьому електромагнітне забруднення зросло з надзвичайно низьких природних рівнів приблизно 10 разів. Цей факт свідчить про те, які побутові прилади створюють електромагнітне забруднення. Радіочастотне електромагнітне випромінювання також використовується для радарів, сканерів безпеки, інтелектуальних лічильників та медичного обладнання (МРТ, діатермія та радіочастотна абляція).

Ймовірно, це антропогенний вплив, що найбільш швидко зростає на навколишнє середовище з середини ХХ століття, і його рівні знову значно зростуть, оскільки такі технології, як Інтернет і 5G, додають мільйони радіочастотних передавачів.

Існує навіть онлайн-база даних в якій зібрано рецензії досліджень радіочастотного електромагнітного випромінювання та інших штучних електромагнітних полів нижчих частот.

Було проведено значну кількість досліджень (включаючи дослідження в експериментальних системах на людях, тваринах та рослинах). При цьому моніторинг електромагнітного забруднення показав:

1. Більшість наукових спостережень та дослідів продемонстрували значні біологічні ефекти та вплив на здоров'я, пов'язані з впливом антропогенних електромагнітних полів;
2. Попередні дані про радіочастотне електромагнітне випромінювання вказує, що 89% (216 з 242) експериментальних досліджень, що вивчають кінцеві точки окислювального стресу, продемонстрували значні ефекти;
3. Наукові дані спростовують широко поширене твердження про те, що впровадження бездротових технологій не становить небезпеки для здоров'я за допустимих нині рівнів нетеплового радіочастотного впливу.

Штучні електромагнітні поля варіюються від надзвичайно низької частоти (пов'язаної з джерелами електрики та електроприладів) до низької, середньої, високої та надзвичайно високої частоти (в основному пов'язаної з бездротовим зв'язком). Потенційні ефекти цих антропогенних електромагнітних полів на природні електромагнітні поля, такі як резонанс Шумана, що контролює погоду та клімат, на детальному рівні поки що не вивчені.

Невідомо достеменно вплив антропогенного радіочастотного електромагнітного випромінювання інші природні і антропогенні компоненти атмосфери. Широко стверджувалося, що радіочастотне електромагнітне випромінювання, будучи неіонізуючим, не має достатньої енергії фотонів, щоб викликати пошкодження ДНК. Тепер експериментально доведено, що це не так.

Радіочастотне електромагнітне випромінювання викликає пошкодження ДНК, мабуть, через окислювальний стрес. Цим воно схоже на УФ-випромінювання, яке довгий час вважалося нешкідливим. У той час, коли фахівці, які займаються питаннями гігієни навколишнього середовища, займаються серйозними глобальними проблемами, такими як зміна клімату та хімічні токсиканти у громадській охороні здоров'я, існує гостра потреба у вирішенні проблеми так званого електросмогу.

Справжній, заснований на фактичних даних підхід до оцінки ризику та регулювання антропогенних електромагнітних полів, матиме оздоровчий ефект на все живе планети.

Деякі державні органи охорони здоров'я вжили заходів щодо зниження впливу радіочастотного електромагнітного випромінювання на населення. Регулювання стосується використання бездротових пристроїв дітьми і рекомендує в цілому переважне використання пристроїв провідного зв'язку, але це має бути скоординовано міжнародними зусиллями.

Вищесказане дає нам підстави ще раз повернутися до питання про електромагнітне випромінювання і з перших принципів проаналізувати можливості детального опису його взаємодії з середовищем, яке, як буде показано, переводить завдання розсіювання у винятково складну площину багатоцентрового багаторазового розсіювання. Розповісти про це ми вирішили, насамперед, представникам спеціальності Технології захисту навколишнього середовища. Але представлений матеріал може скласти інтерес і представникам інших спеціальностей, які мають справу з електромагнітним випромінюванням, параметризацією його взаємодії з різними середовищами і, нарешті, із захистом від його негативного впливу (наприклад, від згаданого електросмогу).

# 1 ЕЛЕКТРОМАГНІТНЕ ВИПРОМІНЮВАННЯ

## 1.1 Основні відомості про електромагнітне випромінювання

Електромагнітне випромінювання є важливим аспектом електродинаміки. Воно відіграє ключову роль у нашому розумінні світу, а також має практичне значення в різних галузях, від телекомунікацій до медицини.

Пригадаємо основні рівняння Максвелла, які описують взаємодію електричних та магнітних полів. Ці рівняння формулюються наступним чином:

$$\begin{aligned} \nabla \cdot \vec{D} &= \rho, \quad \nabla \cdot \vec{B} = 0; \\ \nabla \times \vec{E} &= -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}, \quad \nabla \times \vec{H} = \vec{J} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \end{aligned} \quad (1.1)$$

Ці рівняння були розроблені Джеймсом Клерком Максвеллом у XIX столітті і є фундаментальною основою для теорії електромагнетизму. Рівняння Максвелла включають чотири основних рівняння, які описують зв'язок між електричними та магнітними полями, а також взаємодію зарядів та струмів.

Ці рівняння враховують взаємодію електромагнітних полів зі збудженими зарядами та струмами в середовищі, а також допомагають розширити теорію електромагнетизму на випадки, коли враховується діелектричність та магнетичність матеріалів.

Зокрема, вектор напруженості магнітного поля  $\vec{H}$  використовується для опису магнітних властивостей матеріалів, а вектор струму зміщення електричного поля  $\vec{D}$  допомагає врахувати діелектричність середовища та розподіл електричних зарядів.

Отже, ми маємо систему рівнянь Максвелла, які описують електромагнітні поля. Розглянемо їх у вакуумі, де немає вільних зарядів та струмів ( $\rho = 0, \vec{J} = 0$ ). В цьому випадку система рівнянь набуває вигляду:

$$\begin{aligned} \nabla \cdot \vec{E} &= 0, \quad \nabla \cdot \vec{B} = 0; \\ \nabla \times \vec{E} &= -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}, \quad \nabla \times \vec{B} = \varepsilon_0 \mu_0 \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} \end{aligned} \quad (1.2)$$



Розглянемо третє з рівнянь (1.2) і застосуємо операцію ротора до обох боків цього рівняння та скористаємося властивостями диференціювання, то отримаємо:

$$\nabla \times (\nabla \times \vec{E}) = -\nabla \times \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (1.3)$$

За допомогою векторного ідентичного виразу «ротор ротора» та рівняння векторного аналізу, ми можемо переписати це рівняння як:

$$\nabla^2 \vec{E} - \nabla(\nabla \cdot \vec{E}) = -\frac{\partial^2 \vec{B}}{\partial t^2} \quad (1.4)$$

Оскільки  $\nabla \cdot \vec{E} = 0$  для вакууму, у нас залишається:

$$\nabla^2 \vec{E} = -\frac{\partial^2 \vec{B}}{\partial t^2} \quad (1.5)$$

Аналогічно, можна показати, що для магнітного поля виконується рівняння:

$$\nabla^2 \vec{B} = -\frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2} \quad (1.6)$$

Ці рівняння представляють собою хвильові рівняння для електричного та магнітного полів. Вони описують поширення електромагнітних хвиль у вакуумі зі швидкістю  $c = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}}$ , яка дорівнює швидкості світла.

Розглянемо одну з координат, скажімо,  $x$ , і нехай у нас є лише електричне поле  $\vec{E}(x, t)$ . Хвильове рівняння набуває вигляду:

$$\frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial x^2} = \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2} \quad (1.7)$$

Припустимо, ми шукаємо розв'язок у вигляді плоскої хвилі:

$$\vec{E}(x, t) = \vec{E}_0 e^{i(kx - \omega t)}, \quad (1.8)$$

де  $\vec{E}_0$  – комплексний амплітудний вектор,  $k$  – хвильове число,  $\omega$  – кругова частота.

Підставивши цей розв’язок в рівняння і скорочуючи за спільними множниками, отримаємо:

$$k^2 = \frac{\omega^2}{c^2} \Rightarrow k = \frac{\omega}{c} \quad (1.9)$$

Це співвідношення називається дисперсійним співвідношенням для електромагнітних хвиль у вакуумі.

Враховуючи, що  $e^{ix} = \cos(x) + i\sin(x)$ , можна записати для електричного та магнітного полів:

$$\begin{aligned} \vec{E} &= \vec{E}_0 \cos(\omega t - kx); \\ \vec{B} &= \vec{B}_0 \cos(\omega t - kx) \end{aligned} \quad (1.10)$$

Отже, ми встановили, що електромагнітні хвилі поширюються зі швидкістю світла і описуються дисперсійним співвідношенням  $k = \omega/c$ . Це говорить нам про те, що світло – це електромагнітна хвиля, і що електричне та магнітне поля в світловій хвилі перпендикулярні одне одному та поширюються перпендикулярно до напрямку хвилі.

Електромагнітні хвилі переносять енергію. Векторна величина, яка вказує напрям розповсюдження енергії електромагнітної хвилі в просторі називається вектор Пойнтинга. Вектор названий на честь англійського фізика Джона Генрі Пойнтинга, який у 1884 році запропонував спосіб виразити потік енергії електромагнітної хвилі через площину.

Вектор Пойнтинга  $S$  обчислюється за наступною формулою:

$$S = \frac{1}{\mu_0} \vec{E} \times \vec{B}, \quad (1.11)$$

де  $\vec{E}$  – вектор напруженості електричного поля,  $\vec{B}$  – вектор індукції магнітного поля,  $\mu_0$  – магнітна постійна.

Вектор Пойнтинга вказує на напрям переносу енергії: він направлений вздовж векторного добутку  $\vec{E}$  і  $\vec{B}$  із величиною, пропорційною добутку амплітуд цих полів. Це означає, що енергія рухається від областей з більшими значеннями електричного та магнітного полів до областей з меншими значеннями.

Таким чином, вектор Пойнтинга пов'язаний з певними характеристиками електромагнітного поля, а саме:

1. Інтенсивність електромагнітного випромінювання: Інтенсивність, або потужність, яку несе електромагнітна хвиля через одиницю площі, пов'язана з вектором Пойнтинга. Вона розраховується як середній потік енергії через площину, перпендикулярну напрямку поширення хвилі. Формально, інтенсивність електромагнітного випромінювання можна записати як  $I = \langle \vec{S} \rangle \cdot \vec{n}$ , де  $\langle \vec{S} \rangle$  – середній вектор Пойнтинга за певний час,  $\vec{n}$  – нормаль до площини.
2. Енергія та імпульс електромагнітного випромінювання: Вектор Пойнтинга вказує на розподіл енергії та імпульсу у просторі. Залежно від амплітуди та характеру електричного та магнітного поля, електромагнітне випромінювання може переносити різну кількість енергії та імпульсу.
3. Напрямок поширення енергії: Вектор Пойнтинга вказує напрямок поширення енергії в електромагнітній хвилі. Це допомагає розуміти, як енергія переноситься із джерела випромінювання до приймача.
4. Зв'язок з характеристиками полів: Вектор Пойнтинга залежить від амплітуд та фаз електричного та магнітного полів. Це дозволяє зв'язати зміни в енергії та потоку електромагнітного випромінювання зі змінами в полях.

В цілому, вектор Пойнтинга є потужним інструментом для аналізу розподілу енергії та імпульсу в електромагнітних хвилях. Він допомагає зрозуміти, як ці характеристики взаємодіють зі збудженими зарядами, впливаючи на передачу енергії та взаємодію з оточуючими об'єктами.

Аналіз вектора Пойнтинга є важливим для розкриття механізмів випромінювання, розсіяння та поглинання електромагнітних хвиль. Це дозволяє вченим та інженерам розробляти більш ефективні та точні системи передачі енергії, антени, оптичні системи та інші технології, що ґрунтуються на використанні електромагнітних випромінювань.

## 1.2 Характеристики електромагнітного випромінювання

Електромагнітні хвилі несуть як енергію, так і імпульс, що робить їх важливими для безлічі застосувань та фізичних процесів. Енергія та імпульс електромагнітних хвиль пов'язані з їх частотою, довжиною хвилі та амплітудою. Енергія електромагнітної хвилі пропорційна квадрату амплітуди її електричного та магнітного полів. Максимальна енергія переноситься в ділянках хвилі, де амплітуди електричного та магнітного полів максимальні. Інтенсивність електромагнітної хвилі (потужність, що переноситься через одиничну площу перпендикулярно напрямку поширення хвилі) пропорційна квадрату амплітуди поля і обернено пропорційна квадрату довжини хвилі:

$$I = \frac{1}{2} c \varepsilon_0 E_0^2, \quad (1.12)$$

де  $c$  – швидкість світла,  $\varepsilon_0$  – електрична стала,  $E_0$  – амплітуда електричного поля.

Імпульс електромагнітної хвилі також пов'язаний з її енергією та швидкістю поширення. Імпульс можна уявити як енергію, перенесену в часі. Для плоскої електромагнітної хвилі імпульс  $p$  та енергія  $E$  пов'язані так:

$$E = pc, \quad (1.13)$$

де  $c$  – швидкість світла.

Отже, електромагнітні хвилі несуть як енергію, так і імпульс, що робить їх важливими як для освітлення та передачі інформації, так і для глибшого розуміння фізичних процесів.

Енергія та імпульс електромагнітних хвиль є ключовими характеристиками, які визначають безліч їх застосувань і важливість у сучасній технології та науці. Наприклад:

- в сонячній енергетиці сонячні панелі поглинають енергію світла та перетворюють її в електричну енергію.
- в радіозв'язку, оптичному зв'язку та мобільному зв'язку використовується передача сигналів за допомогою електромагнітних хвиль різних частот.

- в медицині рентгенівські промені використовуються для створення зображень структур всередині організму.
- в науці дослідження гамма-випромінювання дозволяють вивчати ядерні реакції та структуру речовини на атомному рівні.

Електромагнітне випромінювання має ряд важливих характеристик, які визначають його властивості та застосування. Однією з них є довжина хвилі  $\lambda$ , яка визначає найменшу відстань між двома точками, в яких хвиля має однакову фазу. Вона пов'язана з частотою  $f$  за допомогою співвідношення  $c = f\lambda$ , де  $c$  – швидкість світла у вакуумі.

Розглянемо простий приклад. Нехай ми маємо радіосигнал з частотою  $f = 100$  МГц. Знайдемо відповідну довжину хвилі  $\lambda$ . Використовуючи співвідношення  $c = f\lambda$ , де  $c \approx 3 \cdot 10^8$  м/с – швидкість світла, отримаємо:

$$\lambda = \frac{c}{f} = \frac{3 \cdot 10^8 \text{ м/с}}{100 \cdot 10^6 \text{ Гц}} = 3 \text{ м.}$$

Отже, довжина хвилі цього радіосигналу становить приблизно 3 метри.

Електромагнітне випромінювання можна умовно подати як шкалу електромагнітних хвиль.

Радіохвилі мають найдовші довжини хвиль в електромагнітному спектрі. Вони використовуються у радіозв'язку та телебаченні. Довжини хвиль радіохвиль зазвичай становлять від кількох метрів до сотень кілометрів. Частоти радіохвиль варіюють від кількох герц (низька частота) до кількох гігагерц (висока частота). Приклади застосувань: FM-радіо (частотна модуляція), AM-радіо (амплітудна модуляція), радары.

Мікрохвилі мають коротші довжини хвиль, ніж радіохвилі. Вони використовуються в радіозв'язку, супутниковому зв'язку, мікрохвильових печах. Діапазон частот мікрохвиль варіює від кількох гігагерц до десятків гігагерц. Мікрохвилі можуть поглинатися водою та іншими діелектриками, що робить їх корисними для розігріву їжі та в медичних застосуваннях, таких як діатермія.

Інфрачервоне випромінювання має довжини хвиль, більші, ніж видиме світло, і його відчують як тепло. Діапазон частот інфрачервоного випромінювання простягається від кількох терагерц до приблизно 300 ТГц.

Цей вид випромінювання широко використовується в термографії, дистанційному зондуванні, медицині та промисловості.

Видиме світло – це та частина електромагнітного спектра, яку ми сприймаємо очима. Воно охоплює діапазон довжин хвиль від приблизно 380 нм (фіолетовий) до 750 нм (червоний). Видимий спектр поділяється на кольори: фіолетовий, синій, зелений, жовтий, помаранчевий та червоний. Кожен колір відповідає певній довжині хвилі. Видиме світло відіграє вирішальну роль у нашому сприйнятті навколишнього світу та є основою для оптики та зображень.

Ультрафіолетове (УФ) випромінювання має коротші довжини хвиль, ніж видиме світло. УФ-випромінювання поділяється на три області: УФ-А (довжини хвиль приблизно 400-315 нм), УФ-Б (довжини хвиль приблизно 315-280 нм) та УФ-С (довжини хвиль приблизно 280-100 нм). УФ-випромінювання може викликати пошкодження ДНК в клітинах та використовується в стерилізації, медичних процедурах та контролі якості матеріалів.

Рентгенівські промені мають ще коротші довжини хвиль і високу енергію. Вони використовуються в медицині для створення зображень кісток та тканин (рентгенографія), а також в науці та промисловості для дослідження внутрішньої структури матеріалів.

Гамма-випромінювання має найкоротші довжини хвиль і найвищу енергію. Воно є результатом ядерних реакцій і використовується в медицині (радіотерапія), науці (ядерні дослідження) та промисловості (стерилізація).

Кожен вид електромагнітного випромінювання має свої характерні властивості та застосування. Цей різноманітний спектр випромінювання грає важливу роль у нашому житті, від щоденних технологій до фундаментальних наукових досліджень.

### 1.3 Природні та штучні джерела електромагнітних випромінювань

Один з найяскравіших прикладів природного джерела електромагнітного випромінювання – це Сонце. Сонячне випромінювання є джерелом усього спектру електромагнітних хвиль, але безпосередньо на Землю та природні системи впливає видиме світло, ультрафіолетове та

інфрачервоне випромінювання. Це і є головним джерелом енергії для Землі.

Сама Земля також є джерелом електромагнітного випромінювання. Електричне поле Землі має середню напруженість  $E \approx 130$  В/м. Менша напруженість у полюсів, більша – у екватора. Ці величини змінюються під впливом сонячної активності, енергії космічних випромінювань.

Інший приклад – зоряні системи. Зірки випромінюють енергію через процеси ядерних реакцій у своєму ядрі. Це випромінювання може бути в діапазоні від радіохвиль до гамма-випромінювання.

Штучні джерела електромагнітного випромінювання включають різноманітні пристрої, які створюють та випромінюють електромагнітні хвилі для різних цілей. Одним з найважливіших прикладів є антени. Антени використовуються для передачі та прийому радіохвиль, мікрохвильових сигналів і навіть світла.

Ще одним широко застосовуваним джерелом є лазери (від англійської «Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation»). Лазери генерують інтенсивне монохроматичне (одноколірне) світло, яке відрізняється від загального білого світла, яке ми бачимо навколо нас. Лазерний принцип базується на явищі випромінювання відповідних фотонів при побудові атомів або молекул у збудженому стані до менш збудженого або основного стану. Стимульоване випромінювання полягає в тому, що фотони, які вже перебувають у збудженому стані, можуть стимулювати інші атоми або молекули до випромінювання світла того ж самого частотного діапазону та фази. Це призводить до підсилення світлової хвилі, яка поширюється крізь лазерний вихідний отвір.

Лазери мають велике застосування в комунікаціях. Оптичні волоконні кабелі, які передають інформацію за допомогою світла, дозволяють передавати величезні обсяги даних на великі відстані з високою швидкістю та надійністю. Це забезпечує високошвидкісний інтернет, телефонію, телебачення та інші сервіси. Таким чином лазери знаходять застосування у медицині, науці, технології та багатьох інших галузях. Їх можна використовувати як точні інструменти для лікування, вимірювань, зв'язку тощо.

Так само як і лазери працюють мазери («Microwave Amplification by Stimulated Emission of Radiation»). Мазери генерують електромагнітне випромінювання, що належить радіодіапазону шкали електромагнітних хвиль. У техніці мазери застосовують для космічного зв'язку, у фізичних

дослідженнях, а також як квантові еталони частоти. Крім штучних, багато природних мазерних джерел, наприклад, у космосі. Це – старі зорі або величезні області молекулярного та іонізованого водню.

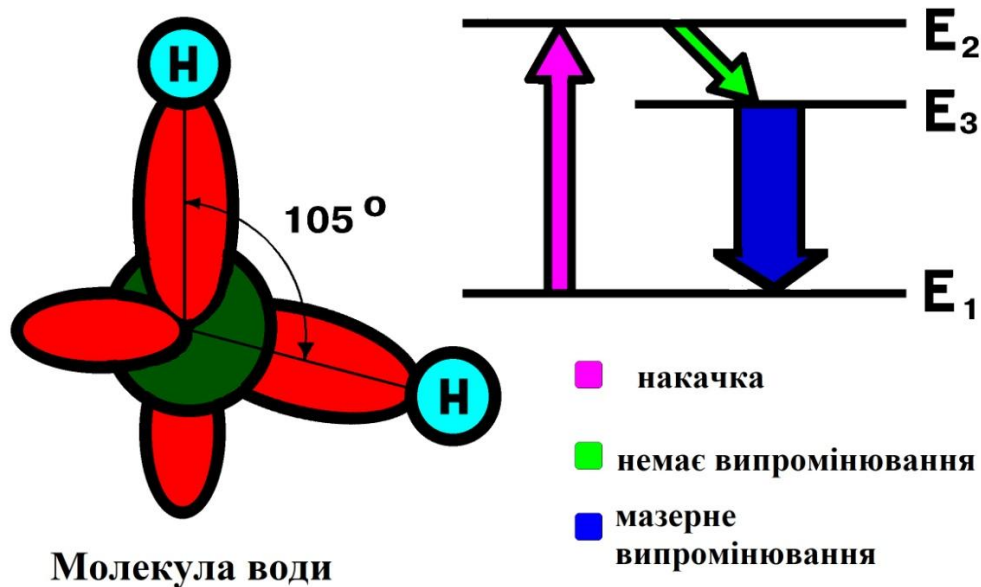


Рисунок 1.1 – Мазерне випромінювання молекули води

Існує ще безліч інших штучних джерел електромагнітного випромінювання, які мають різні застосування в науці, технології та повсякденному житті.

Мікрохвильові печі є широко використовуваними пристроями у кулінарії. Вони генерують мікрохвилі, які нагрівають та \_риготовляють їжу. Мікрохвилі поглинаються водою, жирами та іншими молекулами у їжі, що призводить до їхнього нагрівання шляхом вібрацій та зіткнень молекул.

Рентгенівські та гамма-випромінювання використовуються в медицині та наукових дослідженнях для обстеження внутрішньої структури об'єктів. Рентгенівські промені дозволяють отримати зображення кісток та внутрішніх органів, тоді як гамма-випромінювання використовується для вивчення ядерних процесів та матеріалів.

Інфрачервоні пристрої, такі як теплові камери, використовують інфрачервоне випромінювання для отримання зображень на основі теплового випромінювання об'єктів. Вони мають застосування в промисловості, медицині, військовому дослідженні та інших галузях.



Найпоширенішим на сьогодні джерелом радіочастотного електромагнітного поля є мобільні телефони. Зараз мобільні телефони є практично необхідними атрибутами сучасної культури, які забезпечують швидку та зручну зв'язок, доступ до інтернету та навіть розваги. Однак разом з їх вигодами постає питання про можливий вплив електромагнітного випромінювання на здоров'я.

Мобільні телефони працюють на радіочастотах, що відносяться до електромагнітного спектра. Вони використовують радіохвилі для передачі сигналів між телефонами та станціями зв'язку. Радіочастоти належать до низькочастотного та високочастотного діапазону електромагнітного випромінювання. З огляду на зв'язок між електромагнітним випромінюванням та здоров'ям, дослідження впливу радіочастотного випромінювання на людський організм набувають все більшого значення.

Один із ключових аспектів досліджень полягає у вивченні можливого впливу радіочастотного випромінювання на тканини організму. Відбувається це завдяки взаємодії електромагнітних хвиль з клітинами та біомолекулами. Перш ніж заглиблюватися у цей процес, важливо зазначити, що за наявності великої кількості досліджень, більшість дослідників дійшли висновку, що на даний момент немає вірогідних доказів про те, що радіочастотне випромінювання від мобільних телефонів спричиняє серйозні негативні наслідки для здоров'я.

Однією з ключових цілей досліджень є визначення можливого впливу радіочастотного випромінювання на нагрівання тканин. Вагому роль в цьому відіграють такі параметри, як питома поглинальна здатність, інтенсивність випромінювання, тривалість впливу тощо. Для оцінки можливого підігріву тканин за допомогою мобільних телефонів використовується стандарт «специфічне поглинання енергії» (SAR – Specific Absorption Rate), який вказує на кількість енергії, поглинутої тілом на одиницю маси.

Стандарт SAR вказує на кількість радіочастотної енергії, яку тіло поглинає від радіохвиль. Вимірюється цей показник у ватах на кілограм (Вт/кг) і використовується для оцінки можливого теплового навантаження на тканини через поглинання радіочастотної енергії.

Для смартфонів та інших мобільних пристроїв, що працюють на радіочастотах, існують ліміти SAR, які встановлені органами охорони здоров'я. Ці ліміти зазвичай виражаються у межах 1.6 Вт/кг для загального

використання. Це означає, що тіло не повинно поглинати більше 1.6 Вт енергії на кожен кілограм маси під час використання такого пристрою.

Однак варто враховувати, що рівень поглинання енергії може залежати від відстані між телефоном та тілом користувача, а також від інтенсивності сигналу. Також варто враховувати, що деякі частини тіла можуть поглинати більше енергії, ніж інші, через їхню властиву поглинальну здатність.

Сертифіковані мобільні телефони повинні відповідати обмеженням SAR, що рекомендуються міжнародними організаціями, такими як Всесвітня організація охорони здоров'я (ВООЗ) та інші. Ці обмеження призначені для того, щоб забезпечити безпеку використання мобільних телефонів, враховуючи можливість нагріву тканин.

З іншого боку, важливо відзначити, що більшість сучасних досліджень не підтверджують наявність серйозних негативних наслідків від використання мобільних телефонів. Тим не менше, деякі дослідження показали можливий вплив на рівень комфорту під час використання, такий як відчуття тепла або засмічення сигналу.

Мобільні телефони стали невід'ємною частиною нашого повсякденного життя та інфраструктури сучасного суспільства. І хоча існують певні обліковані ризики, здебільшого дослідження та наукові дані на сьогоднішній день не дають підстав для серйозної стурбованості щодо можливого негативного впливу на здоров'я при нормальному використанні.

Загальної рекомендації щодо нормального використання мобільних телефонів можна дотримуватися, щоб зменшити можливий вплив радіочастотного випромінювання на організм. Деякі з цих рекомендацій включають:

1. Використання гарного сигналу: Якщо у вас є гарний сигнал, то вихідна потужність передачі зазвичай менше, що може знизити поглинання енергії.
2. Збільшення відстані: Збільшення відстані між телефоном та тілом може зменшити рівень радіочастотної енергії, яку поглинає ваше тіло.
3. Використання гарнітури: Використання гарнітури або бездротових навушників може дозволити вам тримати телефон далі від тіла, знижуючи експозицію радіочастотному випромінюванню.

4. Зменшення тривалості розмови: Зменшення тривалості часу розмови на телефоні також може допомогти знизити загальну експозицію.
5. Використання режиму польоту: Коли телефон не використовується для дзвінків або передачі даних, переключення в режим польоту вимикає радіопередавачі, зменшуючи вплив радіочастотного випромінювання.

#### 1.4 Контрольні запитання до розділу 1

1. Що таке рівняння Максвелла і чому вони важливі в електродинаміці?
2. Як рівняння Максвелла пояснюють взаємодію електромагнітних полів зі зарядами та струмами?
3. Що таке вектор Пойнтинга, і як він пов'язаний з характеристиками електромагнітних полів та поширенням енергії?
4. Які ключові характеристики електромагнітних хвиль визначають їх енергію та імпульс?
5. Як імпульс електромагнітної хвилі пов'язаний з її енергією та швидкістю поширення? Як його можна обчислити?
6. Які області електромагнітного спектра застосовуються в різних технологічних та наукових сферах? Наведіть приклади застосувань для кожної з областей.
7. Які природні джерела електромагнітного випромінювання впливають на Землю та її природні системи?
8. Які фактори впливають на напруженість електричного поля Землі і як вони змінюються?
9. Яким чином працюють лазери та яке застосування вони мають?
10. Які параметри визначають можливий вплив радіочастотного випромінювання на організм, і які ліміти SAR встановлені для смартфонів та інших мобільних пристроїв?

## 2 ВЗАЄМОДІЯ ЕЛЕКТРОМАГНІТНОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ З РЕЧОВИНОЮ

### 2.1 Поширення електромагнітних хвиль в середовищах

Вивчення взаємодії електромагнітного випромінювання з речовиною є ключовим аспектом фізики та є основою для розуміння багатьох явищ та технологічних застосувань. Ця взаємодія базується на взаємодії електричних та магнітних полів електромагнітних хвиль з атомами та молекулами речовини. Зважаючи на загальну структуру електромагнітних хвиль, ми знаємо, що вони складаються з електричного та магнітного поля, які взаємодіють між собою та з навколишнім середовищем.

Залежно від властивостей електродинамічних параметрів середовища діляться на лінійні та нелінійні. Середовища, у яких електродинамічні параметри залежить від інтенсивності електричних і магнітних полів, називаються лінійними. Середовища, у яких ця залежність спостерігається, називаються нелінійними. У природі всі середовища слід розглядати як нелінійні. Проте більшість середовищ при малих полях зі слабо вираженою залежністю від величини поля для простоти вважають лінійними.

Лінійні середовища поділяються на однорідні, неоднорідні, ізотропні та анізотропні. Однорідними називаються середовища, у яких електродинамічні параметри змінюються від точки до точки. Середовища, у яких електродинамічні параметри – функції системи координат, належать до неоднорідним.

Ізотропними називаються середовища, в яких електродинамічні параметри однакові в усіх напрямках. Анізотропними називаються середовища, в яких хоча б один із параметрів залежить від напрямку.

У ізотропних середовищах електродинамічні параметри – постійні скалярні величини. У цих середовищах електричні вектори є паралельними один одному, так само як і магнітні. У анізотропних середовищах ця паралельність порушується.

Взаємодія електромагнітного поля з речовиною може змінювати розподіл заряду та створювати струми у речовині.

Середовища можуть істотно відрізнитися величиною об'ємної провідності, тому за однієї й тієї напруженості електричного поля у яких можуть порушуватися різні струми. Для зручності класифікації середовищ

на провідники та діелектрики вводять поняття ідеального провідника та ідеального діелектрика. Ідеальні провідники – це середовища, питома провідність яких нескінченна. Ідеальні діелектрики – це середовища, питома провідність яких дорівнює нулю. Вочевидь, що у ідеальному провіднику збуджуються лише струми провідності, а ідеальному діелектрику – лише струми зміщення.

Параметри плоскої хвилі в реальних діелектриках мало відрізняються від параметрів у середовищі без утрат. Постійна згасання  $\alpha$  у реальних діелектриках – дуже мала величина й у першому наближенні залежить від частоти. У справжніх діелектриках дисперсійні характеристики виявляються слабо.

У реальних провідниках електромагнітні хвилі відчувають сильне поглинання.

При взаємодії з електромагнітним полем, метали здатні відбивати електромагнітні хвилі значно краще, ніж діелектрики. Дослідження показали, що для електромагнітних хвиль (як і для світлових променів) кут падіння хвилі дорівнює кутові відбивання.

Заломлення світла відбувається при переході з одного середовища в інше, де швидкість поширення світла різна. Це процес зміни напрямку поширення світла при зміні середовища. Дослідження показали також справедливості закону Снелліуса – відношення синуса кута падіння до синуса кута заломлення є величиною постійною для даних двох діелектричних середовищ і не залежить від кута падіння:

$$\frac{\sin \theta_1}{\sin \theta_2} = n , \quad (2.1)$$

де  $\theta_1$  – кут падіння,  $\theta_2$  – кут заломлення,  $n$  – відносний показник заломлення середовищ. Крім того, для більшості прозорих діелектричних середовищ було доведено, що

$$\frac{\sin \theta_1}{\sin \theta_2} = n = \sqrt{\epsilon} , \quad (2.2)$$

як впливало з теорії Максвелла ( $\mu=1$ ).

Для звичайних діелектриків існує кут Брюстера, при якому не відбувається відбиття хвилі, а хвиля повністю заломлюється в другому

діелектрику (вся енергія проходить паралельно поляризованій хвилі з першого середовища в другу). Значення кута Брюстера можна розрахувати за формулою ( $\mu_1=\mu_2=1$ ):

$$\theta_B = \operatorname{arctg} \sqrt{\frac{\varepsilon_2}{\varepsilon_1}}. \quad (2.3)$$

## 2.2 Хвилі на поверхні розділу двох діелектриків

При переході хвиль з одного середовища до іншого можна, природно, припускати існування трьох типів хвиль: падаючої, відбитої і заломленої.

При падінні хвилі під довільним кутом коефіцієнти відбиття та заломлення залежать як від кута падіння та заломлення, так і від поляризації падаючої хвилі. У разі падіння хвилі з перпендикулярною поляризацією (вектор  $E$  падаючої хвилі перпендикулярний площині падіння) відношення амплітуд можна знайти за формулами Френеля:

$$R = \frac{E_r}{E_i} = \frac{n_1 \cos \theta_i - n_2 \cos \theta_t}{n_1 \cos \theta_i + n_2 \cos \theta_t}; \quad (2.4)$$

$$T = \frac{E_t}{E_i} = \frac{2n_1 \cos \theta_i}{n_1 \cos \theta_i + n_2 \cos \theta_t}.$$

$E_r$  – комплексна амплітуда відбитої хвилі,

$E_t$  – комплексна заломленої хвилі,

$E_i$  – амплітуда падаючої хвилі.

$n_1$  – показник заломлення середовища, з якого падає хвиля,

$n_2$  – показник заломлення середовища, в яку хвиля проходить,

$\theta_i$  – кут падіння,

$\theta_t$  – кут заломлення.

У разі падіння хвилі з паралельною поляризацією (вектор  $E$  падаючої хвилі паралельний площині падіння) формули виглядають наступним чином:

$$R = \frac{E_r}{E_i} = \frac{n_2 \cos \theta_i - n_1 \cos \theta_t}{n_2 \cos \theta_i + n_1 \cos \theta_t};$$

$$T = \frac{E_t}{E_i} = \frac{2n_1 \cos \theta_i}{n_2 \cos \theta_i + n_1 \cos \theta_t}.$$
(2.5)

Падіння електромагнітної хвилі на поверхню розділу між діелектриком і провідником відрізняється від падіння між двома діелектриками.

### 2.3 Хвилі на поверхні розділу діелектрик – провідник

Розглянемо випадок, коли хвиля, що рухається в діелектричному середовищі з параметрами  $\epsilon_1$ ,  $\mu_1$  і  $\sigma_1 = 0$ , зустрічає на своєму шляху ідеальну провідну поверхню з  $\sigma_2 = \infty$ . Вважатимемо, що поверхня розділу знаходиться в площині  $xOy$ . Напрямок поширення падаючої хвилі відповідає позитивному напрямку осі  $z$ . Характеристичний опір ідеально провідної поверхні дорівнює нулю. Тоді коефіцієнт відбиття для хвиль з нормальним падінням і для хвиль, що падають під кутом з перпендикулярною поляризацією, дорівнюватиме мінус одиниці, а для хвиль, що падають під кутом, але з паралельною поляризацією – плюс одиниці. У разі негативного коефіцієнта відбиття електричне поле падаючої та відбитої хвиль на поверхні провідника віднімається і загальне поле дорівнює нулю  $E = 0$ , а магнітне, навпаки, складається і подвоюється  $H = H_i + H_r = 2H_i$ . Поверхневий струм  $J$  при цьому протікає в напрямку  $E_i$ , а його амплітуда дорівнює подвоєній амплітуді магнітного поля падаючої хвилі  $J = H = 2H_i$ .

Якщо плоска електромагнітна хвиля падає з повітря під кутом  $\varphi$  на плоску металеву поверхню з великою, але кінцевою провідністю, то при  $\mu_1 = \mu_2$  показник заломлення  $n = \sqrt{\epsilon_2/\epsilon_0} \gg 1$ , а кут заломлення  $\psi$  буде дуже малим.

Іншими словами, при будь-якому куті падіння хвиля входить усередину металу майже по нормалі до поверхні.

## 2.4 Контрольні запитання до розділу 2

1. Яка різниця між лінійними та нелінійними середовищами в контексті їх електродинамічних параметрів?
2. Які види класифікації лінійних середовищ в залежності від їхніх властивостей?
3. Як впливає взаємодія електромагнітного поля з речовиною на розподіл заряду та струмів у середовищі?
4. Які типи хвиль виникають при переході хвиль з одного середовища до іншого, і які це хвилі?
5. Як залежать коефіцієнти відбиття та заломлення від кута падіння та заломлення хвилі? Як вони також можуть залежати від поляризації падаючої хвилі при падінні під довільним кутом?
6. Які саме формули Френеля використовуються для знаходження відношення амплітуд при падінні хвилі з перпендикулярною поляризацією?
7. Чим відрізняється процес падіння електромагнітної хвилі на поверхню розділу між діелектриком і провідником від падіння між двома діелектриками?
8. Які коефіцієнти відбиття виникають при падінні хвиль з нормальним падінням на ідеальну провідну поверхню та під кутом з перпендикулярною та паралельною поляризацією?
9. Які наслідки має негативний коефіцієнт відбиття для електричного та магнітного полів падаючої та відбитої хвилі на поверхні провідника?
10. Як змінюються показник заломлення і кут заломлення для плоскої електромагнітної хвилі, яка падає на металеву поверхню під кутом, коли показники заломлення та кут заломлення мають певні характеристики?



### **3 ЕЛЕМЕНТИ НАВКОЛИШНЬОГО СЕРЕДОВИЩА ЯК СИСТЕМИ І ОБ'ЄКТИ ЗАХИСТУ**

3.1 Елементи навколишнього середовища – повітря, вода, ґрунт, біологічні системи. Засоби їх захисту

В сучасному світі, де технологічний розвиток зростає з кожним днем, питання впливу нашого оточення на здоров'я та довкілля стає все актуальнішим. Елементи навколишнього середовища, такі як повітря, вода, ґрунт та інші, мають важливе значення як об'єкти захисту. Важливо зрозуміти, як електромагнітне випромінювання взаємодіє з навколишнім середовищем. Електромагнітні хвилі, які поширюються від джерел випромінювання, можуть впливати на атмосферу, ґрунт, водні ресурси та біологічні об'єкти. Цей вплив може мати як позитивні, так і негативні наслідки, і важливо розуміти ці аспекти для розробки ефективних заходів захисту.

Один з основних аспектів, який потрібно враховувати, – це вплив електромагнітного випромінювання на здоров'я людини. Це може стосуватися як довготривалого впливу низькочастотних полів, так і короткочасного впливу високочастотних хвиль, наприклад, від мобільних телефонів.

Для забезпечення безпеки та мінімізації впливу шкідливого випромінювання на навколишнє середовище розробляються різні методи та елементи захисту. Для прикладу, в місцях зі значною кількістю електронних пристроїв, де електромагнітне випромінювання може бути інтенсивним, використовуються екранувальні матеріали та конструкції, які зменшують зовнішні впливи.

Вплив на атмосферу. Електромагнітні хвилі можуть взаємодіяти з атмосферою, що може призвести до різних наслідків. Наприклад, радіочастотні хвилі можуть впливати на розповсюдження радіохвиль, спричиняючи відбиття та розсіювання. Це може викликати зміни в якості радіосприймання.

Вплив на водні ресурси. Електромагнітні хвилі можуть також впливати на водні ресурси, такі як озера, річки та моря. Наприклад, радіочастотні хвилі можуть викликати нагрівання води, що може вплинути на розподіл температури водних об'єктів та призвести до змін у розповсюдженні організмів, які залежать від температурних умов.

Вплив на ґрунт. Електромагнітне випромінювання може впливати на фізичні та хімічні властивості ґрунту. Наприклад, мікрохвильове випромінювання може призводити до нагріву ґрунту та впливати на його структуру. Це може мати наслідки для рослинності та ґрунтового мікробіологічного життя.

Вплив на біологічні системи. Можливо найбільш важливий аспект – це вплив електромагнітного випромінювання на живі організми. Відомо, що певні діапазони електромагнітних хвиль, зокрема у видимому та УФ-діапазонах, є необхідними для життя та фотосинтезу рослин. Проте, існує обмежена здатність організмів адаптуватися до певних діапазонів частот.

На прикладі птахів можна побачити вплив мобільних операторів, які використовують високочастотні діапазони. Електромагнітне випромінювання може викликати зміни в спілкуванні та міграційних маршрутах птахів.

Електромагнітні хвилі можуть стимулювати зріст та фотосинтез рослин, проте зайвий вплив може призвести до надмірного росту та зміни фізіології рослин.

Електромагнітне випромінювання може впливати на підземні організми, такі як мікроорганізми та комахи. Це може вплинути на біорізноманіття та екосистемні процеси.

З ростом використання бездротових технологій і збільшення обсягу електромагнітного випромінювання, виникає потреба у заходах захисту від його шкідливого впливу. Одним із способів забезпечення захисту є використання електромагнітних екранів та створення зон з обмеженою радіохвильовою активністю.

#### Специфічні приклади захисту:

1. Електромагнітні екрани – це матеріали або конструкції, призначені для відбивання або поглинання електромагнітних хвиль. Вони можуть використовуватися для блокування або зменшення потоку електромагнітного випромінювання до певних об'єктів або приміщень. Такі екрани часто використовуються у промисловості, медичних пристроях, а також в житлових приміщеннях для зниження рівня електромагнітного випромінювання. Так, в медичних закладах часто використовуються електромагнітні екрани для блокування зовнішнього електромагнітного випромінювання, яке може впливати на точність обладнання для діагностики, такого як магнітно-резонансні томографи. В електронних пристроях, де важливий захист від зовнішнього

електромагнітного випромінювання, таких як електронні прилади для вимірювання, використовуються спеціальні корпуси з електромагнітними екранами. Електромагнітні екрани можуть використовуватися для захисту конфіденційної інформації від віддаленого перехоплення сигналів.

2. Зони з обмеженою радіохвильовою активністю, також відома як "електромагнітно тиха зона", – це область, де обмежений рівень електромагнітного випромінювання, що генерується різними джерелами, включаючи бездротові мережі та мобільні телефони. Ці зони можуть бути створені в спеціально обладнаних приміщеннях, таких як лабораторії чи офіси, де важливо забезпечити низький рівень електромагнітного випромінювання для захисту технічного обладнання чи співробітників.
3. Матеріали для захисту від електромагнітного випромінювання. Деякі матеріали мають властивості забезпечувати захист від електромагнітного випромінювання. Ці матеріали можуть використовуватися для створення електромагнітних екранів або спеціальних одягів. Деякі з таких матеріалів використовують металеві або намагнічені волокна, які здатні відбивати або поглинати електромагнітні хвилі. Інші матеріали можуть містити композиції, що розсіюють або абсорбують електромагнітне випромінювання.

Зростання рівня електромагнітних полів вимагає вдосконалення методів захисту. По-перше, щодо захисних екранів, то оцінка електромагнітного середовища повинна бути проведена до вибору матеріалу екрану та структури; включає визначення частотних і амплітудних параметрів електромагнітних полів, зовнішніх і внутрішніх джерел випромінювання. Також для максимального зниження впливу цього фізичного фактора на людину необхідно підібрати розумне співвідношення параметрів загасання та відбиття екрана. Наприклад, застосування феромагнітних електромагнітних екранів є найбільш прийнятним за умови повного блокування джерела поля або врахування ефекту відбиття, що дає змогу попередньо розрахувати ефективність екранування виключно з геометричних питань. Варіабельність коефіцієнтів екранування слід враховувати при застосуванні електромагнітного екранування через явища дифракції на краях екрана. При високих частотах електромагнітного випромінювання необхідно враховувати параметри перфорації та ґратки екрану. І звичайно ж в усіх

випадках необхідно враховувати доцільність виготовлення та встановлення екрану, а також його вартість, яка забезпечується раціоналізацією вибору коефіцієнтів екранування та відбиття (тобто за принципом розумної адекватності).

### 3.2 Селективність у виборі технологій захисту навколишнього середовища

Однією з ключових стратегій для досягнення цієї мети захисту навколишнього середовища є вибір ефективних технологій захисту.

Селективність – це принцип, що передбачає вибір найбільш ефективних і придатних рішень з численних можливих альтернатив. У контексті вибору технологій захисту навколишнього середовища цей принцип передбачає відбір технологій, які найкраще відповідають конкретним умовам та завданням. Селективність враховує ефективність, екологічність, економічність та соціальний вплив технологій. Селективність у виборі технологій захисту навколишнього середовища грає важливу роль у досягненні сталого розвитку. Вона допомагає уникнути витрат на непотрібні або недоцільні технології, а також зменшити негативний вплив на довкілля. Правильно підібрані технології можуть сприяти зменшенню викидів забруднюючих речовин, оптимізації використання ресурсів та поліпшенню якості повітря, води та ґрунту.

Але крім переваг у селективності є і обмеження. Порівняємо їх за допомогою таблиці (табл. 3.1).

Селективність у виборі технологій захисту навколишнього середовища є ключовим підходом для досягнення сталого розвитку та збереження природних ресурсів. Вона допомагає максимізувати позитивний вплив технологій на довкілля та суспільство, уникнувши негативних наслідків.

Для застосування селективності потрібно спочатку з'ясувати, які характеристики електромагнітного випромінювання (полів) можуть завдавати шкоди об'єктам та системам навколишнього середовища. В першу чергу це стосується живих організмів, зокрема людини.

Таблиця 3.1 – Переваги і недоліки селективності у виборі технологій захисту навколишнього середовища

Переваги	Обмеження та недоліки
<b>Ефективність:</b> Вибір оптимальних технологій дозволяє досягти максимальної ефективності захисту навколишнього середовища з обмеженими ресурсами.	<b>Неоднорідність:</b> Селективність може стикатися з труднощами у виборі технологій у ситуаціях з великою кількістю невизначеностей та неоднорідностей.
<b>Екологічність:</b> Селективність допомагає вибрати технології, які мають менший негативний вплив на довкілля та сприяють його відновленню.	<b>Суб'єктивність:</b> Оцінка ефективності технологій може бути суб'єктивною та залежати від індивідуальних переконань та інтересів.
<b>Економічність:</b> Оптимально вибрані технології можуть зменшити витрати на захист навколишнього середовища та збільшити віддачу від інвестицій.	<b>Зміна обставин:</b> Технології та обставини можуть змінюватися, що вимагає постійного оновлення вибору технологій.
<b>Соціальний вплив:</b> Селективність допомагає враховувати соціальні аспекти, забезпечуючи підтримку спільності та задоволення потреб суспільства.	

Щоб визначити, коли проявляється шкідливий вплив електромагнітного поля на організм, потрібно враховувати не тільки значення напруженості електричного та магнітного полів, а й інші фактори, такі як тривалість експозиції, частота, індивідуальна чутливість тощо. Рекомендації для гранично допустимих рівнів електромагнітних полів можуть бути наведені у різних системах вимірювання, відповідно до міжнародних норм та стандартів, наприклад, таких як ICNIRP (International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection).

Отже, неіонізуюче випромінювання (NIR) – це загальний термін, який використовується для опису електромагнітного випромінювання, яке не несе достатньо енергії фотонів для іонізації атомів або молекул і, згідно з його визначенням, також включає механічні хвилі (інфра- та ультразвук). Неіонізуюче випромінювання поділяється на частоти (кількість коливань за секунду) або діапазони довжин хвиль (відстань між двома піками коливань). Ця класифікація не завжди використовується строго і може відрізнятися залежно від джерела інформації. ICNIRP використовує підкатегорії NIR, які групують частоти або діапазони довжин хвиль разом, і розглядає ці групи окремо з точки зору захисту.

Низька частота (LF) – це абревіатура, яка використовується для позначення змінних у часі електричних і магнітних полів низької частоти, яка описує ту частину електромагнітного спектру, що включає діапазон частот від 1 Гц до 100 кГц. Поля НЧ мають дві складові: електричне поле, обумовлене електричним зарядом, і пов'язане з ним магнітне поле. Магнітні поля виникають лише тоді, коли протікає електричний струм. Електрична складова вимірюється у вольтах на метр (В/м). Магнітний компонент вимірюється в амперах на метр (А/м) і виражається як щільність потоку в теслах (Т) або в деяких країнах у гаусах (Гс).

Низькочастотні поля в основному пов'язані з постачанням електроенергії через генерацію, розподіл і використання змінного струму (АС). Частота, яка використовується для цієї мети, зазвичай становить 50 або 60 Гц залежно від країни. У повсякденному житті люди піддаються дії НЧ полів навколо електроприладів та електронних пристроїв переважно вдома та на роботі. Лінії електропередач також є джерелом НЧ полів.

Коли люди піддаються дії НЧ полів, у тілі генеруються електричні поля та струми, які можуть заважати власним електричним полям і струмам організму, пов'язаним із нормальним біологічним функціонуванням. Крім того, електричне поле НЧ взаємодіє із зарядом поверхні тіла. На низьких рівнях ці взаємодії здебільшого залишаються непоміченими та не шкодять здоров'ю. Однак, вище певного рівня впливу, який називається порогом, індуковані внутрішні поля провокують оборотні ефекти на збудливі клітини в організмі, такі як слабке мерехтіння світла на периферії поля зору (фосфени); вплив електричного заряду на шкіру (схоже на те, що відчувається, коли ви розчісуєте волосся, змушуючи волосся підніматися); або стимуляція нервів і м'язів, що відчувається як відчуття поколювання. Ці ефекти виникають при різних порогах залежно від частоти поля. При більш високих рівнях LF викликає незворотні серцево-судинні ефекти або опіки тканин.

Потенційні наслідки для здоров'я, пов'язані з довготривалим впливом низьких рівнів, ретельно вивчалися протягом останніх кількох десятиліть.

Радіочастотні електромагнітні поля (РЧ ЕМП) – це термін, який використовується для опису частини електромагнітного спектру, що включає діапазон частот від 100 кГц до 300 ГГц. У цьому діапазоні частот електричні та магнітні поля, які разом складають електромагнітні поля, взаємопов'язані та розглядаються спільно для вимірювань. Вплив РЧ-ЕМП

зазвичай вимірюється у ватах на квадратний метр ( $\text{Вт}/\text{м}^2$ ) або ватах на кг ( $\text{Вт}/\text{кг}$ ).

Радіочастотні електромагнітні поля використовуються в різних технологіях, найбільш широко для цілей зв'язку (наприклад, мобільні телефони, базові станції, Wi-Fi, 5G, радіо, телебачення, пристрої безпеки), а також у медицині (наприклад, магнітно-резонансна томографія (МРТ) обладнання), для обігріву (наприклад, мікрохвильові печі) і для бездротової передачі енергії (наприклад, Qi).

Після кількох десятиліть досліджень РЧ-ЕМП щодо численних потенційних впливів на здоров'я єдиним підтвердженим впливом радіочастотного ЕМП на здоров'я та безпеку людини є нагрівання відкритої тканини. Поля РЧ-ЕМП можуть проникати всередину тіла (чим вища частота, тим менша глибина проникнення) і викликати вібрацію заряджених або полярних молекул всередині. Це призводить до тертя і, отже, до тепла.

Тіло може пристосуватися до невеликого збільшення тепла подібно до того, як надлишок тепла тіла розсіюється під час виконання спортивної діяльності. Це тому, що людське тіло має сильну здатність регулювати свою внутрішню температуру. Однак перевищення певного рівня (відомого як поріг) залежно від тривалості опромінення, вплив РЧ-ЕМП і супутнє підвищення температури можуть спровокувати серйозні наслідки для здоров'я, такі як тепловий удар і пошкодження тканин (опіки).

Гострі та довгострокові наслідки опромінення РЧ-ЕМП нижче теплового порогу були широко вивчені без демонстрації негативних наслідків для здоров'я.

Було проведено значну кількість досліджень щодо взаємозв'язку між РЧ-ЕМП і наслідками для здоров'я, такими як головний біль, проблеми з концентрацією уваги, якість сну, когнітивні функції, вплив на серцево-судинну систему тощо. Це дослідження не виявило жодного такого впливу на здоров'я. Єдиним стабільно спостережуваним виявленням є невеликий вплив на мозкову активність, виміряну за допомогою електроенцефалографії (ЕЕГ). Однак біологічне значення цих невеликих змін неясно. Наприклад, не доведено, що вони впливають на якість сну чи пов'язані з будь-якими іншими несприятливими ефектами.

Були проведені численні дослідження стосовно впливу радіочастотних електромагнітних випромінювань, які використовуються саме в мобільній телефонії, та раку. Серед усіх цих досліджень ризик

виникнення пухлин поблизу вуха, де тримають телефон, наприклад, пухлин головного мозку, був у центрі уваги більшості епідеміологічних досліджень. Кілька з цих епідеміологічних досліджень повідомили про незначне статистичне збільшення ризику деяких пухлин головного мозку для невеликої групи тих, хто довго і активно користується мобільним телефоном. Повідомлення про упередження та недоліки досліджень може пояснити отримані результати. Кілька досліджень не повідомляли про збільшення кількості пухлин головного мозку під час використання мобільного телефону. Крім того, експериментальні дослідження на тваринах і клітинах не змогли підтвердити результати епідеміологічних досліджень, і немає жодного біофізичного механізму, який міг би пояснити канцерогенність при таких низьких рівнях впливу. Крім того, підвищений ризик, який спостерігається в деяких епідеміологічних дослідженнях, не узгоджується зі стабільною частотою появи цих видів раку в популяції. Це важливий момент, враховуючи широке та значне зростання використання мобільних телефонів серед населення за останні кілька десятиліть. Загальна оцінка всіх досліджень РЧ-ЕМП приводить до висновку, що вплив РЧ-ЕМП нижче теплового порогу навряд чи буде пов'язано з негативними наслідками для здоров'я.

Щоб уникнути небезпеки для здоров'я та запобігти несприятливій взаємодії з РЧ-ЕМП (тобто, щоб запобігти тепловому стресу всього тіла та надмірному локальному нагріванню), ICNIRP рекомендує обмежити вплив РЧ-ЕМП таким чином, щоб поріг, за якого ці взаємодії стають шкідливими, ніколи не досягався. Основні обмеження, як правило, виражаються через питомий коефіцієнт поглинання енергії (SAR) або щільність поглиненої потужності. Для різних частин тіла та для джерел, що працюють поблизу тіла, і тих, що працюють на віддаленій відстані, рекомендуються різні базові значення обмежень. Рівні опромінення поза тілом називаються контрольними рівнями. Вони виведені з основних обмежень із використанням реалістичних припущень у найгіршому випадку таким чином, що залишаючись нижче контрольних рівнів (у повітрі), призведе до впливу (в організмі), який буде значно нижчим, ніж той, який є результатом основних обмежень у переважній більшості випадків.

Інфрачервоне випромінювання (ІЧ), також відоме як теплове випромінювання, – це смуга в спектрі електромагнітного випромінювання з довжинами хвиль вище червоного видимого світла від 780 нм до 1 мм.



ІЧ-проміння класифікується як ІЧ-А (780 нм-1,4 мкм), ІЧ-В (1,4-3 мкм) і ІЧ-С, також відоме як далеко ІЧ (3 мкм-1 мм). Поширеними природними джерелами є сонячна радіація та вогонь. Звичайні штучні джерела включають нагрівальні прилади та інфрачервоні лампи, які використовуються вдома та в інфрачервоних саунах для оздоровлення. Промислові джерела тепла, такі як виробництво сталі/чавуну, також потрапляють в інфрачервону область. Лазери є особливим джерелом ІЧ-випромінювання, яке випромінюється в одному або кількох надзвичайно вузьких діапазонах довжин хвиль.

ІЧ проникає в шкіру та очі людини на різну глибину від кількох міліметрів за допомогою ІЧ-А до поверхневого поглинання ІЧ-С. У людей є вроджена захисна реакція відразу на біль від високої температури та на яскраве світло, яке часто також присутнє, щоб уникнути потенційно шкідливого впливу. Шкідливий вплив інфрачервоного випромінювання на здоров'я зумовлений термічним ушкодженням тканин, здебільшого через молекули води, а також через зміни структури білка.

Основний шкідливий вплив на здоров'я високого ІЧ-випромінювання стосується очей. Рогівка, райдужка, кришталик і сітківка дуже чутливі до різного ступеня термічного пошкодження. Коли рогівка поглинає ІЧ-випромінювання з перетворенням на тепло, воно передається до кришталика. Агрегація білків кришталика після багаторазового впливу сильного тепла може спричинити помутніння кришталика або катаракту, як це часто спостерігається у робітників зі скла та металургії.

Пошкодження шкіри внаслідок гіпертермії може виникнути, але це залежить від інтенсивності та тривалості ІЧ-опромінення. Якщо температура шкіри підтримується на рівні 44 °С, потрібно кілька годин, перш ніж настане незворотне пошкодження. Це менше ніж за секунду при температурі поверхні 70°С. Тривале опромінення шкіри інфрачервоним випромінюванням без опіків, наприклад після багатьох років впливу відкритого вогню, може спричинити появу червоно-коричневих плям на шкірі. Однак вважається, що ІР не відіграє ролі в ініціації раку шкіри.

Якщо все тіло піддається високому рівню тепла, це може призвести до підвищення температури тіла та фізичного теплового стресу. Тепловий стрес необхідно оцінювати з урахуванням усіх сприяючих факторів, включаючи рух повітря, температуру та вологість, а також джерело тепла.

Діапазон довжин хвиль видимого (оптичного) випромінювання не має різких меж. Тут використовується діапазон довжин хвиль від 380 нм

до 780 нм. Існує перекриття з УФ-діапазоном довжин хвиль, який поширюється на 400 нм, і у верхньому діапазоні з інфрачервоним.

Звичайними природними джерелами видимого випромінювання є сонце та вогонь. Звичайні штучні джерела включають лампи для освітлення, проєктори, дисплеї, світлові індикатори, зварювальні дуги та лазери.

Унікальна властивість видимого випромінювання, або «світла», полягає в тому, що воно передається через рогівку та кристалик ока на сітківку та викликає зоровий стимул. За нормальних умов зіниця ока контролює рівень світла, що досягає сітківки. Коли цей рівень занадто високий, виникає природна реакція відрази, наприклад примружування або моргання.

Короткий погляд на сонце або інше яскраве джерело може призвести до короткочасної появи залишкових зображень. Крім того, може виникнути «блискавична сліпота». Ці наслідки можуть бути неприємними, а у випадку сліпоти можуть бути небезпечними в певних ситуаціях, наприклад, для водіїв і пілотів.

Дивлячись на сонце, наприклад, під час перегляду сонячного затемнення незахищеними очима, або на інші дуже яскраві джерела, такі як зварювальні дуги, протягом тривалого часу спричинить фототоксичні реакції в сітківці, які можуть призвести до втрати зорової функції у уражені ділянки. Це називається фотохімічною небезпекою для сітківки ока або небезпекою синього світла.

Вплив надзвичайно яскравих джерел, таких як потужні лампи-спалахи на близькій відстані, або лазерне випромінювання із середнім або вищим рівнями потужності також може призвести до високого локального підвищення температури, що спричинить термічне пошкодження сітківки ока протягом мілісекунд (тобто занадто швидко для природної реакції відрази). щоб запобігти травмам). Цей опік сітківки призводить до локальної втрати поля зору, тобто темної плями. Інші поглинаючі тканини, зокрема райдужка та шкіра, також піддаються ризику опіків.

Вважається, що видиме випромінювання не відіграє ролі в ініціації раку шкіри. Однак деякі ліки можуть призвести до фотосенсибілізації шкіри, так що вплив видимого випромінювання може викликати токсичні фотохімічні реакції в шкірі.

Якщо все тіло піддається впливу високого рівня видимого (та/або інфрачервоного) випромінювання, то температура всередині тіла може

піднятися до рівня, що спровокує фізичний тепловий стрес. Тепловий стрес необхідно оцінювати, враховуючи всі сприяючі фактори, тобто не лише опромінення від джерела, але й рух повітря, температуру та вологість повітря, а також робоче навантаження.

Що стосується короткохвильового (тобто синього світла) видимого випромінювання, тривають дискусії про те, що це може прискорити старіння сітківки.

Синє світло також пригнічує секрецію мелатоніну, який сприяє регуляції циклів сну та неспання. Наслідки дерегуляції денного та нічного (циркадного) ритму для здоров'я залишаються неясними та продовжують бути предметом досліджень.

Ультрафіолетове (УФ) випромінювання – це смуга неіонізуючого випромінювання, яка знаходиться поруч із іонізуючим випромінюванням в електромагнітному спектрі. УФ-випромінювання класифікується як UVA (400–315 нм), UVB (315–280 нм) і UVC (280–100 нм). Сонце є основним джерелом ультрафіолетового випромінювання, але все сонячне ультрафіолетове випромінювання та більша частина ультрафіолетового випромінювання В поглинаються земною атмосферою, тому на земній поверхні найбільшу частку ультрафіолетового випромінювання становить UVA (понад 90%). Однак вплив ультрафіолетового випромінювання В є біологічно набагато важливішим, ніж UVA.

Рівні ультрафіолетового випромінювання на поверхні землі змінюються обернено до широти, тому вони найвищі на екваторі та найнижчі на полюсах. Виснаження озону в стратосфері штучними хлорфторвуглецями призвело до підвищення рівнів УФВ у деяких високоширотних регіонах. Рівень UVB змінюється залежно від сезону та дня, влітку він вищий, ніж взимку, і найвищий опівдні. Хмарність зменшує земне УФ. Відбиття ультрафіолетового випромінювання В від атмосфери та світлих поверхонь, таких як сніг, сухий пісок і вода, значно підвищує рівень сонячного УФВ на поверхні землі.

Кілька джерел штучного ультрафіолетового випромінювання є на виробництві та в медичних закладах. До них відносяться ртутні лампи, обладнання для дугового зварювання, комерційні бактерицидні ультрафіолетові лампи та стоматологічне обладнання для полімеризації. Солярії, які використовуються для косметичної засмаги, стали більш поширеним джерелом ультрафіолетового випромінювання в багатьох країнах за останні два десятиліття.

У людей вплив УФВ на шкіру в невеликих кількостях відповідає за синтез вітаміну D, необхідного для здоров'я кісток. Однак вплив ультрафіолетового випромінювання на клітини шкіри має шкідливий вплив на здоров'я. У короткостроковій перспективі інтенсивне опромінення блідої шкіри UVB викликає запалення або сонячні опіки та місцеву імуносупресію. Довготривале опромінення глибоких шарів шкіри ультрафіолетовим випромінюванням протягом багатьох років спричиняє зморшки та передчасне старіння шкіри, а також викликає рак шкіри, наприклад базально-клітинний рак, плоскоклітинний рак і злоякісну меланому.

Меланін – це природний пігмент зовнішньої шкіри, який відповідає за колір шкіри. Це служить для фізіологічної фільтрації ультрафіолетового випромінювання та захисту глибших клітин шкіри від пошкодження ультрафіолетом. Тому люди зі смаглявою шкірою, які мають природний високий рівень пігменту, рідко страждають від шкідливого впливу ультрафіолетового випромінювання. У тих, у кого бліда шкіра, опромінення УФВ стимулює пігментні клітини виробляти додаткову кількість меланіну для засмаги шкіри та тимчасового захисту. Світлошкірі люди різною мірою засмагають після перебування на сонці, а люди, такі як альбіноси та люди з рудим волоссям, які не можуть засмагати, дуже схильні до шкідливого впливу ультрафіолету.

Вплив високого рівня УФ-випромінювання на очі також шкідливий. Інтенсивне ультрафіолетове опромінення може спричинити запалення рогівки (зовнішня поверхня ока) та пошкодження сітківки (задня частина ока). Довготривале опромінення викликає дегенеративні зміни, такі як небажане зростання тканини рогівки, помутніння кришталика, відоме як катаракта, дегенерація сітківки та різні види раку ока.

Основні способи захисту шкіри та очей – уникати перебування на сонці в середині дня, знаходитися в тіні та носити захисний одяг, включаючи капелюх із широкими полями та сонцезахисні окуляри з боковими панелями. Крім того, сонцезахисний крем широкого спектру дії (тобто захищає як від UVA, так і від UVB) із сонцезахисним фактором (SPF) принаймні 15+ слід наносити належним чином і повторно наносити після потовиділення, плавання або після тривалого перебування на сонці. Особливо немовлят і маленьких дітей слід добре захищати від інтенсивного сонця.

У робочих місцях на відкритому повітрі рекомендується стандартний захисний одяг і застосування сонцезахисного крему широкого спектру, який необхідний для захисту працівників на відкритому повітрі. Необхідно враховувати низку факторів, таких як тип роботи та відбивання УФ-поверхні в робочому середовищі. Для працівників у приміщенні, які піддаються впливу штучних джерел, таких як УФ-випромінювальні лампи для стерилізації або УФ-лазери, запобіжні заходи включають структурні заходи, адміністративний контроль та засоби індивідуального захисту. Окремі працівники повинні бути повністю обізнані про ризики надмірного ультрафіолетового випромінювання.

Щодо засобів колективного захисту від електромагнітного випромінювання (полів та токів) промислової частоти, вони можуть включати різні технічні рішення та заходи, спрямовані на зниження впливу електромагнітного випромінювання на робоче середовище та людей. Деякі з основних видів таких засобів:

1. Екранування: Використання матеріалів, що мають високу провідність, для створення електромагнітних екранів, які поглинають або відбивають електромагнітне випромінювання. Такі екрани можуть бути встановлені навколо обладнання чи робочих зон.
2. Дистанційність: Збільшення відстані між джерелами електричних полів та людьми. Зменшення впливу поля відбувається згасанням електричного поля з відстанню.
3. Виключення джерел поля: Закриття або ізоляція джерел електричних полів. Це може включати вимкнення обладнання або встановлення бар'єрів, які блокують випромінювання.
4. Заходи з заземлення: Забезпечення ефективного заземлення обладнання та структур, що знижує можливість утворення електричних полів.
5. Оптимізація розташування обладнання: Розташування обладнання та джерел полів таким чином, щоб мінімізувати їх вплив на робочі зони.
6. Широкопasmові фільтри: Використання спеціальних фільтрів, які зменшують випромінювання на конкретних частотах.
7. Організаційні заходи: Використання графіків роботи, які обмежують тривалість експозиції, регулювання часу роботи та часу відпочинку для зменшення впливу.

8. Особисті засоби захисту: Використання ізолюючого одягу, головних уборів, взуття та інших спеціальних засобів для захисту від електричних полів.

Зазначені засоби можуть використовуватися окремо або в поєднанні з іншими, залежно від конкретної ситуації та типу джерел електромагнітного випромінювання. Однак ефективність цих заходів може варіювати і вимагає врахування специфічних умов робочого середовища, тобто, застосування селективності у виборі технологій захисту.

### 3.3 Захисні екрани

Екранування - це технічний метод захисту від електромагнітних полів, який передбачає використання матеріалів з високою провідністю для створення бар'єрів, які поглинають або відбивають електромагнітне випромінювання. Такі екрани забезпечують утворення зони, де рівень поля менший, ніж без екрану.

Ефективність екранування залежить від кількох факторів, включаючи тип матеріалів, які використовуються, їх товщину, розташування екранів та частоту електромагнітного поля. Основні аспекти екранування від електромагнітного випромінювання містять:

- Матеріали екрану: Для ефективного екранування використовують матеріали з високою провідністю, такі як мідь або алюміній. Ці матеріали можуть бути використані у вигляді фольги, металевих плит, сітки або спеціальних покриттів.
- Бар'єри та обгортки: Металеві плити або фольга можуть бути встановлені навколо обладнання або робочих зон для створення фізичного бар'єру. Також можуть використовуватися спеціальні матеріали з високою провідністю, які обгортають обладнання.
- Парафіровані уземлені джерела: Уземлені металеві коробки, що містять обладнання, можуть бути захищені парафіном або спеціальними покриттями для створення ефективного екрану.
- Зменшення негерметичності: Для ефективного екранування важливо уникати проникнення електромагнітного поля через щілини, отвори та роз'єми в екранах. Спеціальні ущільнювачі та з'єднувачі можуть допомогти запобігти цьому.

- Плоскі або клітинчасті структури: Для певних застосувань використовують плоскі або клітинчасті структури, які забезпечують екранування без значного обмеження видимості або вентиляції.

Крім цього, захисні екрануючі прилади можуть мати різні конструктивні вирішення в залежності від їх призначення, робочого середовища та джерел електричних полів. Ось деякі конструктивні способи, які можуть бути використані:

1. Металеві обгортки: Обгортки з металевих матеріалів, таких як мідь або алюміній, можуть бути використані для утворення фізичного бар'єру між джерелами електричних полів та навколишнім середовищем. Обгортки можуть мати форму коробки, камери або зашкленого кожуха.
2. Екрануючі фольги: Тонкі металеві фольги, які виготовляються з провідних матеріалів, можуть наклеюватися на поверхні обладнання або робочі зони, щоб забезпечити екранування.
3. Екрануючі покриття: Спеціальні покриття з провідних матеріалів можуть бути нанесені на поверхні обладнання або стін, щоб забезпечити ефективне екранування.
4. Металеві сітки: Тонкі металеві сітки або решітки можуть бути встановлені на вікнах, дверях або інших відкритих поверхнях для блокування проникнення електричних полів.
5. Екрануючі заслонки: Екрануючі заслонки або паркани можуть бути розташовані навколо джерел електричних полів для забезпечення захисту робочого персоналу.
6. Плоскі екрани: Тонкі плоскі екрани можуть бути встановлені між джерелами електричних полів та робочими зонами для забезпечення ефективного екранування.
7. Захисні штори: Спеціальні текстильні або металеві штори можуть бути використані для створення тимчасових екранів під час роботи з обладнанням.
8. Екрануючі матеріали: Матеріали з провідною прослойкою, які використовуються для покриття стін, підлог, стелі або меблів, можуть забезпечити загальне екранування в приміщенні.

Різноманітність та випадковий характер факторів, що визначають ефективність екранування, суттєво ускладнює інженерні розрахунки екранів. Розглянемо дві методики розрахунку. Перша полягає у наступному. Вихідними даними для розрахунку є конструктивні параметри частоти виробу або його вузлів; спектр частот перешкоди та відповідні їм

напруженості електричного та/або магнітного поля; допустима напруженість електромагнітного поля або його складових. Спочатку визначають тип поля. Якщо випромінювач уявити як електричний диполь, то в ближній зоні істотно переважає електричне поле, у разі представлення випромінювача рамкою зі струмом – у ближній зоні переважає магнітне поле. У першому випадку можна говорити про електростатичні, а в другому – про магнітостатичні поля. Наприклад, високовольтні елементи та прилади можуть бути представлені електричним диполем, а котушки індуктивності, трансформатори, друкарські провідники – рамкою зі струмом. У дальній зоні випромінювання потужності електричного та магнітного полів рівні. По-друге, вибирають конструктивну форму екрану в залежності від виробу, що екранується, у вигляді паралелепіпеда, циліндра або сфери. Форма екрану впливає насамперед на характеристичний опір середовища поблизу нього і, як наслідок, на ефективність екранування ( $EE$ ). Крім цього, форма екрану впливає на його резонансні властивості, а саме на значення резонансної частоти.

Ефективність екранування характеризується коефіцієнтом екранування  $EE$ , що є відношенням напруженості електричного  $E_1$  або магнітного  $H_1$  поля в будь-якій точці екранованого простору до напруженості поля  $E_2$  або  $H_2$  в тій же точці за відсутності екрана:

$$EE = E_1/E_2 \text{ або } EE = H_1/H_2 \quad (3.1)$$

На практиці дію екрана прийнято оцінювати ефективністю екранування у децибелах:

$$A = 20 \cdot \lg(EE) \quad (3.2)$$

Нижча резонансна частота екрана може бути визначена за наближеною формулою

$$f_{\text{рез}} \cong \frac{138}{R_E} 10^6 \quad (3.3)$$

Значення  $f_{\text{рез}}$  не повинно входити до спектру частот перешкоди.



Щоб порівнювати екрани різних форм, вводиться узагальнений параметр – еквівалентний радіус екрану  $R_E$ . Для екрану прямокутної форми з розмірами  $l_1, l_2, l_3$

$$R_E = \sqrt[3]{\frac{3}{4\pi} l_1 l_2 l_3}, \quad (3.4)$$

для циліндричного екрану діаметром  $D$

$$R_E = \sqrt{\frac{3}{16} D^2 h}, \quad (3.5)$$

для сферичного екрану  $R_E = r_E$ .

По-третє, вибираємо матеріал та конструкцію стінок екрану. Матеріал стін екрана має найбільший вплив на ефективність екранування. Величиною, що характеризує екрануючу дію матеріалу екрану, є еквівалентна глибина проникнення  $\delta$  (м).

$$\delta = 0.03 \sqrt{\frac{\lambda \rho}{\mu_r}} = 0.52 \sqrt{\frac{\rho}{\mu_r f}}, \quad (3.6)$$

де  $\rho$  – питомий опір матеріалу екрана (Ом·м),  $\lambda$  – довжина хвилі у повітрі (м),  $f$  – частота у МГц. Для немагнітних матеріалів  $\mu_r \cong 1$ , а для феромагнітних матеріалів  $\mu_r$  залежить від частоти  $f$ . Для сталі ця залежність має вигляд  $\mu_r \cong 150 - 30f$  при  $f < 4$  МГц. Якщо екран працює в магнітному полі ближньої зони, ефективність магнітних матеріалів значно вища за немагнітні, так як  $\mu_r \gg 1$ . У електромагнітному полі дальньої зони немагнітні матеріали, що мають більшу провідність порівняно з магнітними, забезпечують більш високу ефективність.

Розглянемо ще один підхід до розв'язання задачі розрахунку  $EE$ . Оскільки основною характеристикою екрану є його ефективність, методика інженерного розрахунку повинна виходити із залежностей цієї характеристики від довжини хвилі  $\lambda$ , модуля хвильового опору діелектрика  $Z$  щодо виду хвилі, матеріалу екрану, параметрів, які визначають геометричні розміри екрану і якість конструкції. Отримати такі залежності лише теоретично дуже складно. Тому зазвичай вдаються до обробки,

узагальнення експериментальних даних та побудови на цій основі формул для розрахунку ефективності екранування в широкому діапазоні частот.

Необхідно, щоб формули були прості та давали необхідну точність збігу розрахункових та експериментальних результатів. У формулах мають бути враховані особливості матеріалів та конструкції екранів, основні фізичні процеси та особливості екранування складових електромагнітного поля. Найбільш зручним як для побудови самої розрахункової формули, так і для її використання є вираз ефективності екранування добутком ряду співмножників, кожен з яких визначає вплив одного з факторів або групи близьких факторів.

У таблиці 3.2 наведемо формули для розрахунків деяких екранів в залежності від їх конструкції.

Таблиця 3.2 – Формули для розрахунку  $EE$  або необхідної товщини  $d$  захисного екрану

Вигляд екрану	Розрахункова формула ( $E, d$ )
Магнітостатичний екран	
циліндричний	$E_H = 20 \lg[1 + 0.25(1 - r_1^2/r_2^2)(\mu_r + 1/\mu_r - 2)]; \text{ при } \mu_r > 1;$ $d = r_2 \left[ 1 - \sqrt{1 - 4(10^{E_H/20} - 1)/(\mu_r + 1/\mu_r - 2)} \right]$ <p>для заданих <math>E_H, \mu_r, r_2</math>; <math>r_1, r_2</math> – внутрішній та зовнішній діаметри екрана</p>
прямокутний	$E_H = 20 \lg[1 + (1 - a_1^2/a_2^2)(\mu_r + 1/\mu_r - 1)];$ $d = 0.5a_2 \left[ 1 - \sqrt{1 - (10^{E_H/20} - 1)(\mu_r + 1/\mu_r - 2)} \right]$ <p><math>a_1, a_2</math> – внутрішній та зовнішній діаметри екрана</p>
сферичний	$E_H = 20 \lg \left[ 1 + 0.22 \left( 1 - \frac{(r_E - d)^3}{r_E^3} \right) (\mu_r + 1/\mu_r - 2) \right];$ $d = r_E \left[ 1 - \sqrt[3]{1 - 4.5(10^{E_H/20} - 1)(\mu_r + 1/\mu_r + 2)} \right]$
Електростатичний екран	
плоский листовий	$E_E \cong 20 \lg[5R_E^3/(a^2 a_1 - a a_1^2)]; \quad R_E \cong \sqrt{S_E/\pi}$ <p><math>S_E</math> – площа поверхні екрана; <math>a</math> – відстань між джерелом і приймачем перешкоди; <math>a_1</math> – відстань від екрану до приймача перешкоди</p>
замкнутої форми	$E_E = 20 \lg(60\pi d/\rho);$ $d_{min} = 10^{E_E/20} / (60\pi/\rho)$

В результаті аналізу багатьох конструкцій екранів різного призначення отриманий вираз для середньої ефективності екранування:

$$E_{0E(H)} = \sqrt{\frac{\delta}{\rho} Z_{E(H)}} \sqrt{\frac{\lambda}{R_E} e^{\frac{2\pi d}{m}} \left(1 - \frac{\pi m}{\lambda}\right)^6}, \quad (3.7)$$

де – глибина проникнення, м;  $\rho$  – питомий опір матеріалу екрану, Ом·м;  $Z_{E(H)}$  – хвильовий опір електричного (магнітного) поля;  $R_E$  – еквівалентний радіус екрану, м;  $a$  – відстань між центрами отворів та щілин в екрані, що виникли через недосконалість його конструкції та технології виготовлення, м;  $m$  – найбільший розмір отвору (щілини) в екрані, м;  $d$  – товщина матеріалу екрану, м.

Застосування конкретних екрануючих приладів та їх конструкція будуть залежати від специфічних умов та вимог конкретної ситуації. Важливо враховувати нормативи безпеки, ефективність захисних заходів та зручність в експлуатації.

Наразі в Україні вплив електромагнітного випромінювання регулюється Законом України «Про забезпечення санітарного та епідемічного благополуччя населення».

У статті 14 Закону України «Про захист прав споживачів», вказано, що «споживач має право на те, щоб продукція за звичайних умов її використання, зберігання і транспортування була безпечною для його життя, здоров'я, навколишнього природного середовища, а також не завдавала шкоди його майну». Законодавчо також регламентується маркування споживчої нехарчової продукції, що має на меті убезпечити користувача від можливих ризиків за умов правильного зберігання та експлуатації цього товару.

Міністерство охорони здоров'я України затверджує норми радіаційної безпеки та допустимі рівні впливу на людину інших фізичних факторів та методику розрахунку розподілу рівнів електромагнітного поля. Згідно з Наказом №239 Міністерства охорони здоров'я «Про затвердження державних санітарних правил та норм», «до джерел електромагнітного випромінювання в населених пунктах належать радіо-, телевізійні і радіолокаційні станції різного призначення, що працюють в смузі радіочастот, а також мережа ліній електропередачі, яка складається з повітряних високовольтних ліній електропередачі та електричних підстанцій. До складу підстанцій можуть входити розподільні пристрої,

перетворювачі електроенергії, трансформатори, випрямлячі та інші пристрої і споруди».

Санітарні норми і правила регламентують умови експлуатації і розміщення джерел випромінювання у житлових забудовах та біля них, тим самим забезпечуючи охорону здоров'я населення від впливу електромагнітних полів, що виникають у навколишньому середовищі.

У розділі 1, пункті 1.6, підпунктах 1.6.4 та 1.6.5 Державних санітарних норм і правил захисту населення від впливу електромагнітних випромінювань вказано, що «власник радіотехнічного об'єкту забезпечує дотримання гранично допустимих рівнів».

### 3.4 Контрольні запитання до розділу 3

1. Як електромагнітне випромінювання може впливати на біологічні системи, зокрема на рослини, птахів та підземні організми?
2. Які заходи захисту від електромагнітного випромінювання існують, і як вони можуть допомогти знизити вплив шкідливого випромінювання на навколишнє середовище та живі організми?
3. Яким принципом керується селективність у виборі технологій для захисту навколишнього середовища?
4. Які аспекти враховуються при застосуванні селективності у виборі технологій для сталого розвитку?
5. Які можливі наслідки для здоров'я пов'язані з впливом низькочастотних полів?
6. Яким чином рекомендації ICNIRP спрямовані на уникнення негативного впливу радіочастотних електромагнітних полів на здоров'я?
7. Що таке екранування і яким чином воно захищає від електромагнітних полів?
8. Які чинники впливають на ефективність екранування?
9. Які основні аспекти включає в себе методика розрахунку ефективності екранування?
10. Які параметри і властивості матеріалів впливають на їхню ефективність при захисті від електромагнітних полів?

## 4 ОКРЕМІ РОЗДІЛИ ТЕОРІЇ БАГАТОЧАСТИНКОВОГО РОЗСІЮВАННЯ

4.1 Загальні відомості з теорій розсіювання Борна і Мі. Огляд методів дослідження багаточастинкового розсіювання

Теорія розсіювання Борна є однією з основних теорій, яка використовується для опису розсіювання електромагнітних хвиль на складних об'єктах, таких як атоми, молекули або частинки. Ця теорія була розроблена фізиком Максом Борном у 1920-х роках і є фундаментальним інструментом в сфері розсіювання.

Основна ідея теорії розсіювання Борна полягає в тому, що розсіюване поле визначається додатковим полем, яке виникає внаслідок взаємодії розсіюючого об'єкта (наприклад, атома чи молекули) зі вхідною хвилею (падаючою хвилею). Однак врахування всіх можливих взаємодій може бути дуже складним завданням. Таким чином, в теорії Борна використовують наближення великого розсіювання, що означає, що взаємодії враховуються тільки між розсіюючим об'єктом та падаючою хвилею, іншими словами, ігноруються взаємодії між самими розсіювачами.

Розсіювальний потенціал:

$$\phi_{scat}(\vec{r}) = \frac{e^{ikr}}{4\pi\epsilon_0 r} \sum_{l=0}^{\infty} \sum_{m=-l}^l a_l Y_{lm}(\theta, \phi) \frac{j_l(kr)}{kr}, \quad (4.1)$$

де  $\mathbf{r}$  – вектор розташування точки спостереження,  $k$  – хвильове число (відносно до хвильової довжини),  $r$  – відстань від джерела до точки спостереження,  $Y_{lm}(\theta, \phi)$  – сферичні гармоніки,  $j_l(kr)$  – сферична функція Бесселя першого роду порядку  $l$ ,  $a_l$  – розсіювальний амплітудний матричний елемент для кожного каналу розсіяння.

Об'єкт, що розсіює (атом, молекула), взаємодіє з падаючою хвилею через розсіювальний потенціал. Це ефективний потенціал, який відображає взаємодію електромагнітної хвилі з електронами чи іншими навколишніми частинками.

Рівняння розсіювального потенціалу:

$$\nabla^2 \phi_{scat}(\vec{r}) + k^2 \phi_{scat}(\vec{r}) = -\frac{e^{ikr}}{\epsilon_0} \sum_{l=0}^{\infty} (2l+1) a_l j_l(kr) P_l(\cos \theta), \quad (4.2)$$

де  $P_l(\cos \theta)$  – поліноми Лежандра.

Основна ідея полягає в визначенні ефективного поля, створеного розсіювачем, та використанні цього поля для знаходження розсіяного поля. Це веде до системи інтегральних рівнянь для ефективних поляризацій та розсіяних полів.

Розсіювальний амплітудний матричний елемент  $a_l$  визначається через параметри розсіювача, характеристики хвильового числа  $k$ , а також квантові числа  $l$  та  $m$ . Він відображає взаємодію вхідного електромагнітного поля з розсіювачем і визначає розсіювальні властивості системи.

Теорія Борна описує розсіювання за допомогою амплітудних матричних елементів. Ці елементи зв'язують падаючу і розсіяну хвилю з вхідною та вихідною конфігурацією системи.

Теорія розсіювання Борна застосовується для аналізу розсіювання на атомах, молекулах, наночастинках та інших складних об'єктах. Вона дозволяє розуміти, як розсіяні хвилі формуються та розповсюджуються відносно розсіюючих об'єктів, що має важливе значення в оптиці, спектроскопії, нанотехнологіях та інших галузях.

Теорія Мі (або теорія Мі-Аберрації) є математичним підходом до моделювання розсіювання світла на нерівномірних поверхнях. Ця теорія була розроблена Густавом Мі та Федеріко Аберрації в 1980-х роках і використовується для аналізу розсіювання світла на поверхнях з мікро- та наноструктурами.

Основна ідея теорії Мі полягає в тому, що нерівномірності поверхні розглядаються як додаткові джерела світла, які розсіюють вхідне світло. Ці додаткові джерела враховуються у вигляді розподілу струмів та зарядів на поверхні. Таким чином, замість моделювання складної мікроструктури поверхні безпосередньо, теорія Мі дозволяє використовувати розподіл струмів та зарядів для опису розсіювання.

Ця теорія стала основоположною для розуміння розсіювання на наноструктурах, таких як грубі поверхні, наночастинки, плазмоні наноструктури тощо. Вона дозволяє враховувати ефекти розсіювання, які

відсутні у класичних теоріях розсіювання, таких як теорія Мі, розглядає вплив інтерференційних ефектів, резонансних явищ та інших складних взаємодій. Однією з ключових властивостей теорії Мі є можливість моделювання навіть дуже складних структур з різноманітними формами та розмірами. Вона дозволяє враховувати різні аспекти розсіювання на мікро- та наноструктурах, що робить її корисною для багатьох досліджень та застосувань, таких як в оптичних матеріалах, плазмоніке, фотоніці та інших галузях.

Теорії багаточастинкового розсіювання електромагнітного випромінювання включають різні підходи та методи для аналізу розсіювання світла або інших електромагнітних хвиль на складних структурах або частках речовини. Деякі з них враховують множину компонентів розсіюючого об'єкта, що може бути важливим при вивченні реальних об'єктів, таких як частки пилу, дрібні частинки, біологічні клітини та інші структури.

Ось декілька теорій та методів багаточастинкового розсіювання:

1. Мікроскопічні теорії розсіювання: Ці теорії вивчають розсіювання на рівні окремих атомів або молекул. Такі підходи дозволяють розглянути деталі молекулярної структури розсіюючого об'єкта і допомагають розуміти вплив молекулярних характеристик на характер розсіювання.
2. Мультипольні розклади: Ці методи використовують розклад моментів дипольного, квадрупольного, октупольного тощо типів для опису розсіювання на об'єктах зі складними формами або нерегулярною структурою.
3. Метод кратних моментів: Цей підхід дозволяє враховувати додаткові ефекти взаємодії між компонентами розсіюючого об'єкта, такі як взаємодія між дипольними та квадрупольними моментами.
4. Метод геометричних оптичних пучків: Цей метод використовує концепції оптичних пучків та їхню взаємодію зі складними структурами. Він особливо корисний для аналізу розсіювання на великих об'єктах, що перевищують довжину хвилі.
5. Методи чисельного моделювання: Використання чисельних методів, таких як метод скінчених елементів, метод дискретних диполів та інші, дозволяє досліджувати розсіювання на складних структурах за допомогою комп'ютерних симуляцій.

## 4.2 Формальний опис взаємодії випромінювання із гранульованою речовиною в режимі багатократного розсіяння

Розсіяння електромагнітного випромінювання є важливим напрямком досліджень взаємодії іонізуючого випромінювання із речовиною.

Природні об'єкти, такі, наприклад гранульовані матеріали, мають агреговану структуру і, відповідно, складну морфологію. Два основних компоненти багатократного розсіяння – взаємодія і інтерференція мають відмінні риси, в порівнянні з розсіянням на одній частинці.

Опис можливостей використання дискретних мікро-механічних конгломератів (гранульованих) матеріалів для вирішення окремих задач забезпечення довкілля від впливу іонізуючих випромінювань та механічних забруднень, застосування теореми складання для векторних сферичних хвильових функцій дає можливість розглянути проблеми багатократного розсіяння використовуючи методи:

- Розкладення плоскої хвилі в термінах координат зсуву;
- Розсіяння на окремих сферах;
- Вектор трансляційних коефіцієнтів;
- Матрична форма запису для амплітуди розсіяння;
- Повний і диференціальний переріз розсіяння та параметри асиметрії;
- Скорочена параметризація розсіяння у гранульованих матеріалах за допомогою теорії Мі.

### 4.2.1 Розкладення плоскої хвилі в термінах координат зсуву

Сукупність сфер є непоглинаючим однорідним середовищем, що характеризується діелектричною константою  $\omega_0$  і проникливістю  $\mu_0$ . Поля, розсіяні кожною окремою часткою, визначаються у відповідних сферичних системах координат.

В умовно вибраній системі координат  $L$  декартові координати початку нехай дорівнюють  $(X^j, Y^j, Z^j)$ ,  $j = 1, 2, \dots, L$ .

Вектор падаючої плоскої хвилі завжди спрямований у додатну область  $Z$ . Розв'язок задачі розсіяння на багатьох сферах в рамках наближення Мі дається суперпозицією мультиполів падаючої плоскої хвилі і має вигляд розкладу (в термінах ВСФ) для кожної  $L$  сферичної



системи координат ( $Z$  – бігуча плоска хвиля з лінійно поляризованим кутом  $\beta_p$ ).  $Z$  – Характеризується хвильовим вектором  $k = k\hat{e}_z$ , де  $k = \frac{2\pi}{\lambda}$  є хвильовим числом,  $\lambda$  – довжина падаючої хвилі в навколишньому середовищі,  $\hat{e}_z$ ;  $\hat{e}_z$ ;  $\hat{e}_z$  – ортонормовані одиничні вектори в декартовій системі координат). У головній  $j_0$ -ї системі координат, вектор падаючого електричного поля, є

$$E_{inc} = E_0 \exp(ikz), \quad (4.3)$$

де

$$E_0 = E_0(\hat{e}_x \cos \beta_p + \hat{e}_y \sin \beta_p), \quad i = \sqrt{-1}$$

Гармонійна складова  $\exp(-i\omega t)$ ; де  $\omega$  – кутова частота – опущена.

У  $j_0$ -ї системі координат падаюче електромагнітне поле може бути виражене в ВСФ у наступному вигляді:

$$E_{inc} = - \sum_{n=0}^N \sum_{m=-n}^n i E_{mn} [p_{mn} N_{mn}^{(1)}(\rho\theta\phi) + q_{mn} M_{mn}^{(1)}(\rho\theta\phi)]; \quad (4.4)$$

$$H_{inc} = - \frac{k}{\omega\mu_0} \sum_{n=0}^N \sum_{m=-n}^n E_{mn} [q_{mn} N_{mn}^{(1)}(\rho\theta\phi) + p_{mn} M_{mn}^{(1)}(\rho\theta\phi)],$$

де  $\rho = kr$ , та

$$E_{mn} = E_0 i^n \left[ \frac{(2n+1)(n-m)!}{n(n+1)(n+m)!} \right]^{1/2} \quad (4.5)$$

Необхідно визначити, що в цьому випадку нормативний множник, знайдений у (4.3), відрізняється від раніше використаного, який складає функцію:

$$E_{mn} = E_0 i^n (2n+1) \frac{(n-m)!}{(n-m)!}. \quad (4.6)$$

Векторні сферичні хвильові функції  $M^{(1)}$  та  $N^{(1)}$  мають специфічну складну форму

$$M_{mn}^{(1)}(\rho\theta\phi) = [\hat{e}_\theta i \pi_{mn}(\cos\theta) - \hat{e}_\phi(\cos\theta)] j_n(\rho) \exp(im\phi); \quad (4.7)$$

$$N_{mn}^{(1)}(\rho\theta\phi) = \{ \hat{e}_r n(n+1) P_n^m(\cos\theta) \frac{j_n(\rho)}{\rho} + [\hat{e}_\theta \tau_{mn}(\cos\theta) + \hat{e}_\phi i \pi_{mn}(\cos\theta)] \frac{\Psi_n'(\rho)}{\rho} \} \exp(im\phi), \quad (4.8)$$

де  $\hat{e}_r, \hat{e}_\theta, \hat{e}_\phi$  – базисні ортонормовані вектори в сферичних системах координат,  $j_n$  – сферична функція Бесселя першого роду,  $P_n^m$  – об'єднана функція Лежандра першого роду,  $\Psi_n'(\rho) = \rho j_n(\rho)$  – одна з функцій Рікати-Бесселя, позначення похідної від якої має вигляд

$$\begin{aligned} \pi_{mn}(\cos\theta) &= \frac{m}{\sin\theta} P_n^m(\cos\theta); \\ \tau_{mn}(\cos\theta) &= \frac{d}{d\theta} P_n^m(\cos\theta). \end{aligned} \quad (4.9)$$

Визначення, яке застосовується для модуля узагальненої функції Лежандра  $P_n^m$  витримується з точністю до множника  $(-1)^m$ .

З рівнянь (4.4) - (4.6), (4.8), (4.9) і ортогональності, випливає, що розкладання коефіцієнтів у (4.5) приймає вигляд:

$$P_{mn} = \frac{i \int_0^{2\pi} \int_0^\pi \exp(ikz) E_0 \cdot N_{mn}^{(1)}(\rho\theta\phi) \sin\theta d\theta d\phi}{E_{mn} \int_0^{2\pi} \int_0^\pi |N_{mn}^{(1)}(\rho\theta\phi)|^2 \sin\theta d\theta d\phi}; \quad (4.10)$$

$$Q_{mn} = \frac{i \int_0^{2\pi} \int_0^\pi \exp(ikz) E_0 \cdot M_{mn}^{(1)}(\rho\theta\phi) \sin\theta d\theta d\phi}{E_{mn} \int_0^{2\pi} \int_0^\pi |M_{mn}^{(1)}(\rho\theta\phi)|^2 \sin\theta d\theta d\phi}. \quad (4.11)$$

З вище наведеного отримуємо:

$$P_{mn} = Q_{mn} = 0, \quad |m| \neq 1; \quad (4.12)$$

$$P_{1n} = Q_{1n} = \frac{\sqrt{2n+1}}{2} \exp(-i\beta_\rho); \quad (4.13)$$

$$P_{-1n} = -Q_{-1} = -\frac{\sqrt{2n+1}}{2} \exp(i\beta_\rho). \quad (4.14)$$

Зауважимо, що останні результати відрізняються від тих, що зазвичай фігурують у відповідних роботах з розсіяння, за рахунок зміни нормованого множника  $E_{mn}$  у будь-якій  $j$ -й системі координат, розміщеної на  $j$ -й сфері, розклад падаючого поля має такий же вигляд що й співвідношення (4.3):

$$E_{inc}^j = E_{inc} = -\sum_{n=0}^{N^j} \sum_{m=-n}^n i E_{mn} [p_{mn}^j N_{mn}^{(1)}(\rho^j, \theta^j, \phi^j) + q_{mn}^j M_{mn}^{(1)}(\rho^j, \theta^j, \phi^j)], \quad (4.15)$$

$$H_{inc}^j = H_{inc} = -\frac{k}{\omega\mu_0} \sum_{n=0}^N \sum_{m=-n}^n E_{mn}^j [q_{mn}^j N_{mn}^{(1)}(\rho^j, \theta^j, \phi^j) + p_{mn}^j M_{mn}^{(1)}(\rho^j, \theta^j, \phi^j)], \quad (4.16)$$

де  $\rho' = kr'$ .

Враховуючи, що  $z' = z - Z'$  падаюче електричне поле можна також записати, як

$$E_{inc}^j = E_{inc} = E_0 \exp(ikZ'). \quad (4.17)$$

Фазова стала  $\exp(ikZ')$  прив'язана до початку  $j$ -ї системі координат. Це забезпечує те, що записане в  $j$ -й системі координат падаюче поле, не змінюється по фазі відносно центру, який завжди співпадає з початком основної системи координат.

Коефіцієнти розкладання падаючого поля в (4.16) задовольняють співвідношенням

$$p_{mn}^j = \exp(ikZ') P_{mn}, \quad q_{mn}^j = \exp(ikZ') q. \quad (4.18)$$

Співвідношення (2.36) відрізняються від загальних коефіцієнтів розкладу спрощеним виглядом фазової сталої.

#### 4.2.2 Розсіяння на окремих сферах

Окремо розсіяні поля кожної компоненти сферично симетричного розсіювання можуть бути розкладені у відповідних (сферичних) системах координат

$$E_{sca}^l = - \sum_{n=1}^{N^1} \sum_{m=-n}^n i E_{mn} [a_{mn}^l E_{mn}^3(\rho^l, \theta^l, \phi^l) + b_{mn}^l M_{mn}^{(3)}(\rho^l, \theta^l, \phi^l)]; \quad (4.19)$$

$$H_{sca}^l = - \frac{k}{\omega \mu_0} \sum_{n=1}^{N^1} \sum_{m=-n}^n E_{mn} [b_{mn}^l E_{mn}^3(\rho^l, \theta^l, \phi^l) + a_{mn}^l M_{mn}^{(3)}(\rho^l, \theta^l, \phi^l)],$$

де  $M_{mn}^{(3)}$  та  $N_{mn}^{(3)}$  відрізняються від  $M_{mn}^{(1)}$  та  $N_{mn}^{(1)}$  тільки похідною функції  $h_n^{(1)}$  яка є сферичною функцією Ханкеля першого роду (і замінює  $J_n$  сферичну функцію Бесселя першого роду).

Врахування граничних умов для коефіцієнтів парціального розсіяння  $a_{mn}^1$  та  $b_{mn}^1$  для кожної компоненти включає в себе спеціальні схеми пошуку повного розв'язку задачі про багатократне розсіяння.

Врахування стандартних електромагнітних граничних умов накладених на сферичній поверхні відокремленої кулі дає

$$a_{mn}^1 = a_{mn}^{-1} P_{mn}^1, \quad b_{mn}^1 = b_{mn}^{-1} Q_{mn}^1, \quad (4.20)$$

де  $a_{mn}^1$  та  $b_{mn}^1$  – коефіцієнти розсіяння  $M_l$  на окремій  $l$ -тій сфері.

$Q_{mn}^1$  та  $P_{mn}^1$  – коефіцієнти розкладу повного падаючого поля для  $l$ -тої сфери, які мають вигляд:

$$P_{mn}^1 = p_{mn}^1 - \sum_{j \neq l}^{(1,L)} \sum_{v=1}^{N^j} \sum_{\mu=-v}^v (A_{mn\mu v}^{jl} a_{\mu v}^j + B_{mn\mu v}^{jl} b_{\mu v}^j); \quad (4.21)$$

$$Q_{mn}^1 = q_{mn}^1 - \sum_{j \neq l}^{(1,L)} \sum_{v=1}^{N^j} \sum_{\mu=-v}^v (B_{mn\mu v}^{jl} a_{\mu v}^j + A_{mn\mu v}^{jl} b_{\mu v}^j), \quad (4.22)$$

де  $A_{mn\mu v}^{jl}$  та  $B_{mn\mu v}^{jl}$  – векторні трансляційні коефіцієнти, які характеризують перетворення розсіяної від  $j$ -ї сфери хвилі в падаючу для  $l$ -ї сфери.

Повне електромагнітне поле, яке падає на визначену частину сфери, що належить угрупованню, складається з двох частин:

1. Падаюча первинна плоска хвиля.
2. Розсіяні хвилі від сукупності всіх інших сфер.

Рівняння (4.21) та (4.22) включають в себе частково розсіянні поля від всіх взаємодіючих сфер і завдають лінійні системи, які мають невизначені коефіцієнти часткового розсіяння від всіх оточуючих сфер:

$$\frac{a_{mn}^1}{a_n^1} + \sum_{j \neq l}^{(1,L)} \sum_{v=1}^{N^j} \sum_{\mu=-v}^v (A_{mn\mu v}^{jl} a_{\mu v}^j + B_{mn\mu v}^{jl} b_{\mu v}^j) = p_{mn}^1, \quad (4.23)$$

$$\frac{b_{mn}^1}{b_n^1} + \sum_{j \neq l}^{(1,L)} \sum_{v=1}^{N^j} \sum_{\mu=-v}^v (B_{mn\mu v}^{jl} a_{\mu v}^j + A_{mn\mu v}^{jl} b_{\mu v}^j) = q_{mn}^1, \quad (4.24)$$

### 4.2.3 Вектор трансляційних коефіцієнтів

Вектор трансляційних коефіцієнтів можна виразити в термінах Гаунтових коефіцієнтів, а саме:

$$A_{mn\mu\nu}^{jl} = C_0 \exp[i(\mu - m)\vartheta^{jl}] \sum_{q=0}^{q_{max}} i^p C_p a_q h_p^{(1)}(kd^{jl}) p_p^{\mu-m} (\cos \theta^{jl}),$$

$$B_{mn\mu\nu}^{jl} = C_0 \exp[i(\mu - m)\vartheta^{jl}] \sum_{q=1}^{Q_{max}} i^{p+1} b_q h_{p+1}^{(1)}(kd^{jl}) p_{p+1}^{\mu-m} (\cos \theta^{jl}),$$

де:

$$\left. \begin{aligned} p &= n + v - 2q, \\ q_{max} &= \min [n, v, (n+v-|\mu - m|) / 2], \\ Q_{max} &= \min [n, v, (n+v+1-|\mu - m|) / 2], \\ C_0 &= \frac{(-1)^m}{2} \left[ \frac{(2n+1)(2v+1)(n-m)!(v+\mu)!}{n(n+1)v(v+1)(n+m)!(v-\mu)!} \right]^{1/2}, \\ C_p &= n(n+1) + v(v+1) - p(p+m). \end{aligned} \right\} \quad (4.25)$$

Тут,  $(d^{jl}, \theta^{jl}, \vartheta^{jl})$  – сферичні координати в завданій системі;  
 $a_q = a(-m, n, \mu, v, p)$  – коефіцієнти Гаунта.

### 4.2.4 Рекурентні формули для коефіцієнтів Гаунта

Коефіцієнти Гаунта визначаються за допомогою співвідношень

$$a(s, n, \mu, v, p) = \frac{(2p+1)}{2} \frac{(p-s-\mu)!}{(p+s+\mu)!} \int_{-1}^1 P_n^s(x) P_v^\mu(x) P_p^{s+\mu}(x) dx$$

Альтернативне формулювання коефіцієнтів Гаунта здійснюється за допомогою виразів

$$P_n^s(x) P_v^\mu(x) = \sum_{q=0}^{q_{max}} a_q P_p^{s+\mu}(x), \quad (4.26)$$

де:

$$p = n + v - 2q, \quad a_q = a(s, n, \mu, v, p), \quad q_{max} = \min [n, v, (n+v-|s+\mu|)/2]$$

#### 4.2.5 Матрична форма запису для амплітуди розсіяння

Строго аналітичне визначення матриці, яка завдає амплітуди розсіяння від сукупності частинок є базовим при формулюванні положень теорії багаточасткового розсіяння. Цей підхід зокрема дозволяє аналітично сформулювати основні характеристики розсіяння на сукупностях (групах) розсіювачів.

Для  $z$  - поляризованої бігучої падаючої плоскої хвилі, співвідношення між падаючою та розсіяною амплітудою в хвильовій зоні, може бути записано в матричній формі

$$\begin{bmatrix} E_{\parallel sca} \\ E_{\perp sca} \end{bmatrix} = \frac{\exp [ik(r-z)]}{-ikr} \begin{bmatrix} S_2 & S_3 \\ S_4 & S_1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_{\parallel inc} \\ E_{\perp inc} \end{bmatrix},$$

де  $(E_{\parallel inc} \ E_{\perp inc})$ ,  $(E_{\parallel sca} \ E_{\perp sca})$  відповідно, падаюче поле і розсіяні компоненти поля у хвильовій зоні, паралельні і перпендикулярні площині розсіяння, що задається віссю  $z$  (тобто спільним напрямком в якому відбуваються, як падіння, так і розсіяння).

#### 4.2.6 Повний і диференціальний переріз розсіяння та параметри асиметрії

Базуючись на аналітичних виразах для амплітуди матриці розсіяння сукупності частинок, можуть бути отримані строгі формули для опису фундаментальних властивостей розсіяння, включаючи повний і диференціальний перерізи для екстинкції, розсіяння, поглинання і променевого тиску, а також ефектів асиметрії.

Повний і диференціальний перерізи розсіяння,  $C_{sca}$  і  $C_{sca}^l$  сукупностях сфер, завдаються співвідношеннями:

$$\begin{aligned} C_{sca} &= \sum_{l=1}^{\infty} C_{sca}^l = \frac{4\pi}{k^2} \sum_{l=1}^{\infty} \sum_{m=-l}^l \sum_{n=-l}^l \operatorname{Re} [a_{mn}^l a_{mn}^{(t)l} + b_{mn}^l b_{mn}^{(t)l}]; \\ a_{mn}^l &= \sum_{j=1}^l \sum_{v=1}^{N^j} \sum_{\mu=-v}^v (\tilde{A}_{mn\mu v}^{jl} a_{\mu v}^j + \tilde{B}_{mn\mu v}^{jl} b_{\mu v}^j); \\ b_{mn}^{(t)l} &= \sum_{j=1}^l \sum_{v=1}^{N^j} \sum_{\mu=-v}^v (\tilde{A}_{mn\mu v}^{jl} a_{\mu v}^j + \tilde{B}_{mn\mu v}^{jl} b_{\mu v}^j). \end{aligned} \quad (4.27)$$

Зазначим, що

$$\tilde{A}_{mn\mu\nu}^{ll} = \delta_{m\mu} \delta_{n\nu} \text{ та } \tilde{B}_{mn\mu\nu}^{ll} \equiv 0. \quad (4.28)$$

Також  $a_{mn}^{(t)l}$  та  $b_{mn}^{(t)l}$  є відмінними від коефіцієнтів, які характеризують повне розсіяння,  $a_{mn}^l$ , та  $b_{mn}^l$  розкладені біля центру сфери.

Параметр асиметрії сукупності сфер  $\cos \theta$  визначимо за допомогою співвідношень

$$\overline{\cos \theta} = \frac{4\pi}{k^2 C_{sca}} \sum_{l=1}^L \sum_{n=1}^{N^l} \sum_{m=-n}^n \operatorname{Re} \{ a_{mn}^{l*} [\int_1 b_{mn}^{(t)l} + \int_2 a_{mn+1}^{(t)l} + \int_3 a_{mn-1}^{(t)l}] + b_{mn}^{l*} [a_{mn}^{l*} [\int_1 b_{mn}^{(t)l} + \int_2 a_{mn+1}^{(t)l} + \int_3 a_{mn-1}^{(t)l}] ] \}$$

де

$$\begin{aligned} \int_1 &= \frac{m}{n(n+1)} ; \\ \int_2 &= \frac{m}{n(n+1)} \left[ \frac{n(n+2)(n-m+1)(n+m+1)}{(2n+1)(2n+3)} \right]^{1/2} ; \\ \int_3 &= \frac{1}{n} \left[ \frac{(n-1)(n-m)(n+m)}{(2n-1)(2n+1)} \right]^{1/2} . \end{aligned}$$

Повний переріз екстинкції для сукупності сфер може бути записано у наступному вигляді

$$C_{ext} = \sum_{l=1}^L C_{ext}^l = \frac{4\pi}{k^2} \sum_{l=1}^L \sum_{n=1}^{N^l} \sum_{m=-n}^n \operatorname{Re} ( p_{mn}^{l*} a_{mn}^l + q_{mn}^{l*} b_{mn}^l ), \quad (4.29)$$

де  $C_{ext}^l$  є  $l$ -м внеском до диференціального перерізу екстинкції  $l$ -ї компоненти сфери. Для випадку  $z$  – бігучої падаючої плоскої хвилі маємо

$$\begin{aligned} C_{ext} &= \frac{2\pi}{k^2} \operatorname{Re} \sum_{l=1}^L \exp(-ikZ^l) \sum_{n=1}^{N^l} \sqrt{2n+1} \times \\ &\times [(a_{ln}^l + b_{ln}^l) \exp(-i\beta_p) - (a_{-ln}^l - b_{ln}^l) \exp(-i\beta_p)] \end{aligned} \quad (4.30)$$

Зокрема, типові стани поляризації падаючої плоскої хвилі,  $\beta_p=0^\circ$  ( $x$ -поляризованої) і  $\beta_p=90^\circ$  ( $y$  – поляризованої), відповідають наступним перерізам екстинкції:

$$C_{ext=0}^{0^0} = \frac{2\pi}{k^2} \operatorname{Re} \sum_{l=1}^L \exp(-ikZ^l) \sum_{n=1}^{N^l} \sqrt{2n+1} [a_{ln}^{l(0^0)} + b_{ln}^{l(0^0)} - a_{ln}^{l(0^0)} + b_{ln}^{l(0^0)}];$$

$$C_{ext=0}^{90^0} = \frac{2\pi}{k^2} \operatorname{Re} \sum_{l=1}^L \exp(-ikZ^l) \sum_{n=1}^{N^l} \sqrt{2n+1} [a_{ln}^{l(90^0)} + b_{ln}^{l(90^0)} - a_{ln}^{l(90^0)} + b_{ln}^{l(90^0)}]. \quad (4.31)$$

Переріз поглинання може бути знайдено, якщо скористуватися правилом  $C_{abs} = C_{ext} - C_{sca}$ .

Аналогічно,  $C_{abs}$  також можна знайти у явній формі перерізи  $C_{ext}$ ,  $C_{sca}$ ,  $C_{abs}$ .

Різниця між двома отриманими чисельними результатами для  $C_{abs}$  визначає точність розв'язків задачі розсіяння.

Для  $z$  – бігучої падаючої плоскої хвилі, зворотній переріз розсіяння визначається, як

$$C_{bak} = \frac{4\pi}{k^2} |S(\Theta=180^0)|^2, \quad (4.32)$$

де  $S(180^0) = S_1(180^0) = -S_2(180^0)$ . Приймаючи до уваги, що  $\pi_{mn}(-1)$  та  $\tau_{mn}(-1)$  за умов  $|m| = 1$ ,  $\pi_{ln}(-1) = \frac{(-1)^{n+1} n(n+1)}{2}$ , та  $\tau_{ln}(-1) = -\pi_{ln}(-1)$ , рівняння (4.30)-(4.32) призводять до

$$S(180^0) = \frac{1}{2} \sum_{l=1}^L \sum_{n=1}^{N^l} (-1)^{n+1} \sqrt{2n+1} \exp(ikZ^l) \times$$

$$\times [(a_{ln}^l - b_{ln}^l) \exp(i\beta_p) - (a_{ln}^l + b_{ln}^l) \exp(-i\beta_p)], \quad (4.33)$$

За допомогою (2.9) можуть бути отримані повний і диференціальний зворотній перерізи розсіяння на групі (комплексі) сфер.

Розв'язок задачі багатосферного розсіяння можливо отримати з використанням теорії Мі, користуючись  $T$  – матричним представленням.

Лінійні рівняння, що витікають з граничних умов коефіцієнтів часткового розсіяння припускають компакту форму запису в термінах квадратної матриці

$$A_a, \quad \text{де } a = [a_{mn}^l, b_{mn}^l]^T,$$

$$A = [A^{lj}], \quad l, j = 1, 2, \dots, L, \quad 1 \leq n \leq N^l, \quad |m| \leq n.$$

Зворотна до неї  $T=A^{-1}$  є  $T$  – матрицею, яка характеризує процес розсіяння сукупністю частинок.



Всі рівняння для елементів матриці розсіяння залишаються незмінними. Коефіцієнти розсіяння в рівняннях дельта-символів Кроннера породжують для сукупності частинок  $T$  – матрицю наступного виду:

$$\begin{aligned} a_{sn}^l &= \frac{1}{2} \sum_{v=1}^{N_{max}} \sqrt{2n+1} [(T_{sn1v}^{l11} + T_{sn1v}^{l12} - T_{sn-1v}^{l11} + T_{sn-1v}^{l12}) \cos\beta_p - \\ &\quad - (T_{sn1v}^{l11} + T_{sn1v}^{l12} + T_{sn-1v}^{l11} - T_{sn-1v}^{l12}) i \sin\beta_p]; \\ b_{sn}^l &= \frac{1}{2} \sum_{v=1}^{N_{max}} \sqrt{2n+1} [(T_{sn1v}^{l21} + T_{sn1v}^{l22} - T_{sn-1v}^{l21} + T_{sn-1v}^{l22}) \cos\beta_p - \\ &\quad - (T_{sn1v}^{l21} + T_{sn1v}^{l22} + T_{sn-1v}^{l21} - T_{sn-1v}^{l22}) i \sin\beta_p], \end{aligned} \quad (4.34)$$

де  $N_{max} = \max (N^j) (j=1, 2, \dots, L)$ , та  $T_{sn\mu\nu}^{lpq} = \sum_{j=1}^L \exp(ikZ^j) T_{sn\mu\nu}^{jlpq}$ , звідки витікає, що  $T_{sn\mu\nu}^{jlpq} = 0$  коли  $v > N^j$ .

Зокрема, для двох типових типів поляризації падаючої хвилі  $\beta_p = 0^\circ$  та  $90^\circ$ , рівняння (4.34) перетворюються на наступні

$$\begin{aligned} a_{sn}^{l(0^\circ)} &= \frac{1}{2} \sum_{v=1}^{N_{max}} \sqrt{2n+1} [(T_{sn1v}^{l11} + T_{sn1v}^{l12} - T_{sn-1v}^{l11} + T_{sn-1v}^{l12}), \\ b_{sn}^{l(0^\circ)} &= \frac{1}{2} \sum_{v=1}^{N_{max}} \sqrt{2n+1} [(T_{sn1v}^{l21} + T_{sn1v}^{l22} - T_{sn-1v}^{l21} + T_{sn-1v}^{l22}), \\ a_{sn}^{l(90^\circ)} &= -\frac{1}{2} \sum_{v=1}^{N_{max}} \sqrt{2n+1} [(T_{sn1v}^{l11} + T_{sn1v}^{l12} + T_{sn-1v}^{l11} - T_{sn-1v}^{l12}), \\ b_{sn}^{l(90^\circ)} &= \frac{1}{2} \sum_{v=1}^{N_{max}} \sqrt{2n+1} [(T_{sn1v}^{l21} + T_{sn1v}^{l22} + T_{sn-1v}^{l21} - T_{sn-1v}^{l22}), \end{aligned} \quad (4.35)$$

У практичних розрахунках елементи  $T^l$ - матриці ( $T_{mn\mu\nu}^{lpq}$ ) для кожного  $l$  можуть бути знайдені безпосередньо (минаючи стадію визначення компонентів  $T$ - матриці ( $T_{mn\mu\nu}^{lpq}$ )). Така процедура може бути реалізована за допомогою використання відповідних граничних умов для коефіцієнтів неповного розсіяння  $a_{mn}^l$  і  $b_{mn}^l$ .

Наведемо без детальних викладок співвідношення, що визначають перерізи розсіяння у загальному випадку багаточасткового розсіяння, а саме:

$$\begin{aligned} C_{ext} &= \frac{\pi}{k^2} \operatorname{Re} \sum_{l=1}^L \sum_{n=1}^{N^l} \sum_{v=1}^{N_{max}} \sum_{p=1}^2 \sum_{q=1}^2 \sqrt{(2n+1)(2v+1)} \exp(-ikZ^l) \times \\ &\times \{ T_{lnlv}^{lpq} + (-1)^q T_{ln,-lv}^{lpq} \exp(i2\beta_p) + (-1)^p [ T_{-lnlv}^{lpq} \exp(-i2\beta_p) + (-1)^q [ T_{-ln,-lv}^{lpq} ] \}; \end{aligned} \quad (4.36)$$

$$C_{sca} = \frac{\pi}{k^2} \operatorname{Re} \sum_{l=1}^L \sum_{n=1}^{N^l} \sum_{m=-n}^n \sum_{v=1}^{N_{max}} \sum_{v'=1}^{N_{max}} \sum_{p=1}^2 \sum_{q=1}^2 \sum_{q'=1}^2 \times$$

$$\begin{aligned} & \times [(2\nu + 1)(2\nu' + 1)]^{1/2} \{ T_{mnlv}^{lpq*} T_{mn1v'}^{lpq'} + \exp(i2\beta_p) (-1)^{q'} [T_{mn,-1,v'}^{(t)lpq'}] + \\ & + (-1)^q T_{mn,-1v}^{lpq*} [\exp(-i2\beta_p) T_{mn1v'}^{(t)lpq'} + (-1)^{q'} T_{mn,-1,v}^{lpq'}] \}; \end{aligned} \quad (4.37)$$

$$\begin{aligned} \overline{\cos \theta} &= \frac{\pi}{k^2 c_{sca}} \operatorname{Re} \sum_{l=1}^L \sum_{n=1}^{N^l} \sum_{m=-n}^n \sum_{v=1}^{N_{max}} \sum_{v'=1}^{N_{max}} \sum_{p=1}^2 \sum_{q=1}^2 \sum_{q'=1}^2 \times \\ & \times [(2\nu + 1)(2\nu' + 1)]^{1/2} \{ T_{mnlv}^{lpq*} [\tilde{T}_{mn1v'}^{(t)lpq'} + \exp(i2\beta_p) (-1)^{q'} \tilde{T}_{mn,-1,v'}^{(t)lpq'}] + \\ & + (-1)^q T_{mn,-1v}^{lpq*} [\exp(-i2\beta_p) \tilde{T}_{mn1v'}^{(t)lpq'} + (-1)^{q'} \tilde{T}_{mn,-1,v'}^{(t)lpq'}] \}, \end{aligned} \quad (4.38)$$

де

$$\begin{aligned} T_{mn\mu\nu}^{(t)lpq} &= \sum_{l'=1}^L \sum_{n'=1}^{N^{l'}} \sum_{m'=-n'}^{n'} [\tilde{A}_{mnm'n'}^{l'l} T_{m'n'\mu\nu}^{l'pq} + \tilde{B}_{mnm'n'}^{l'l} T_{m'n'\mu\nu}^{l'(3-p)q}], \\ T_{mn\mu\nu}^{(t)lpq} &= \int_1 T_{mn\mu\nu}^{(t)l(3-p)q} + \int_2 T_{m,n+1,\mu\nu}^{(t)lpq} + \int_3 T_{m,n-1,\mu\nu}^{(t)lpq}, \end{aligned} \quad (4.39)$$

з  $\int_1 \int_2 \int_3$  знайденими в (4.39)

$$\begin{aligned} C_{bak} &= \sum_{l=1}^L C_{bak}^l = \frac{\pi}{4k^2} \operatorname{Re} \times \\ & \times \sum_{l=1}^L \sum_{n=1}^{N^l} \sum_{v=1}^{N_{max}} \sum_{l'=1}^L \sum_{n'=1}^{N^{l'}} \sum_{v'=1}^{N_{max}} \sum_{p=1}^2 \sum_{q=1}^2 \sum_{p'=1}^2 \sum_{q'=1}^2 \times \\ & \times (-1)^{n+n'} [(2n + 1)(2n' + 1)(2\nu + 1)(2\nu' + 1)]^{1/2} \exp(ikZ^{ll}) \times \\ & \times \{ (-1)^{p+1} [T_{1n1v}^{lpq*} + (-1)^q T_{1n,-1v}^{lpq*} \exp(-i2\beta_p)] - T_{-1n1v}^{lpq*} \exp(i2\beta_p) + (-1)^q T_{-1n,-1v}^{lpq*} \} \times \\ & \times \{ (-1)^{p'+1} [T_{1n'1v'}^{l'p'q'} + (-1)^{q'} T_{1n',-1v'}^{l'p'q'} \exp(i2\beta_p)] - \\ & - [T_{1n'1v'}^{l'p'q'} \exp(-i2\beta_p) + (-1)^{q'} T_{-1n',-1v'}^{l'p'q'}] \}. \end{aligned} \quad (4.40)$$

При формулюванні  $T$ - матриці багато часткового розсіяння, наданої вище,  $T$ - матриця одноцентричної сукупності  $\Gamma^t$  може бути записана у вигляді:

$$\begin{aligned} T_{mn\mu\nu}^{tpq} &= \sum_{l=1}^L \exp(-ik\Delta^l) T_{mn\mu\nu}^{lpq} = \\ & = \sum_{l=1}^L \sum_{j=1}^L \exp[i(k \cdot d^j - k\Delta^l)] T_{mn\mu\nu}^{jlpq}. \end{aligned} \quad (4.41)$$

Обидві матриці  $T^l$  та  $T^t$  включають внески від початкового та фазового станів і змінюються разом із змінами падаючої компоненти.

Таким чином,  $T^l$  та  $T^t$  не є  $T$  - матрицями в загальноприйнятому сенсі. Тільки  $T$  - матриця повної сукупності частинок і внесків є залежною від падаючого поля.

#### 4.2.7 Скорочена параметризація розсіяння у гранульованих матеріалах за допомогою теорії Мі

Для дослідження використовується метод матриці розсіяння світла на парі сфер, що дотикаються, з фіксованою орієнтацією.

Ефективне розсіяння світла на частинках з певними розмірами відбувається, коли з ними порівнюється довжина хвилі падаючого світла.

Обчислимо елементи матриці розсіяння світла на системі довільно орієнтованих сфер.

Використаємо нормалізовану (стоксівську), матрицю розсіяння  $\bar{\bar{F}}$  (яка дається співвідношенням:

$$\bar{\bar{Z}}(\vartheta) = \frac{4\pi}{C_{sca}} \bar{\bar{Z}}(\vartheta), \quad (4.42)$$

де  $C_{sca}$  – диференційний переріз розсіяння.

Фазова функція,  $\bar{\bar{F}}$  задовольняє умові нормування

$$\frac{1}{4\pi} \oint_{4\pi} \bar{\bar{F}}(\vartheta) d\Omega = 1, \quad (4.43)$$

Внаслідок симетрії частинки і випадкової орієнтації нормалізована матриця розсіяння має діагональну блочну форму:

$$\bar{\bar{F}}(\vartheta) = \begin{vmatrix} F_{11}(\vartheta) & F_{21}(\vartheta) & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ F_{21}(\vartheta) & F_{22}(\vartheta) & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & F_{33}(\vartheta) & F_{34}(\vartheta) \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & -F_{34}(\vartheta) & F_{44}(\vartheta) \end{vmatrix}, \quad (4.44)$$

Таким чином вісім елементів матриці  $F$  є ненульовими і шість з них незалежні. На відміну від одиночних сфер, у разі розсіяння на кластері, що

складається з двох сфер, елементи матриці розсіяння залежать від кута розсіяння, а також від орієнтації.

На рис. 4.1 показані результати чисельного моделювання елементів матриці розсіювання. Результати обчислень свідчать про критичну роль (в розсіюванні електромагнітного випромінювання двокомпонентною кластерною системою сфер) кутових та орієнтаційних параметрів системи розсіювача.

Останнє ствердження знаходиться у порозумінні з властивостями розсіяння  $M_i$  на сферичних частинках із спотвореною поверхнею.

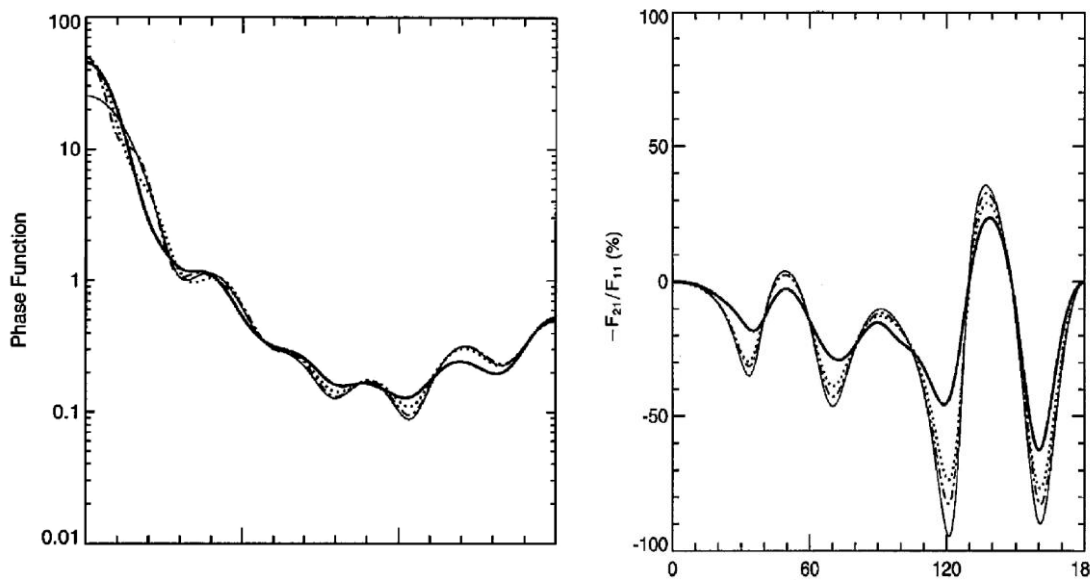


Рисунок 4.1 – Результати чисельного моделювання елементів матриці розсіювання

Головною перевагою використання гранульованих матеріалів для захисту від залишкової радіації є їх здатність до перерозсіювання і поглинання випромінювання та локалізація енергій в широких діапазонах значень. Гранульовані матеріали стійкі до дії радіації та впливу критичних навколишніх станів. Використання «гранульованих екранів» допоможе уникнути проблем пов'язаних з окрихчуванням та іншими деформаціями, які виникають в процесі експлуатації модулів з затверділим цементним матеріалом.

### 4.3 Контрольні запитання до розділу 4

1. Яка основна ідея теорії розсіювання Борна і як вона застосовується?
2. Яке наближення використовується в теорії розсіювання Борна і що воно означає?
3. Як в теорії розсіювання Мі розглядаються нерівномірності поверхні та як вони впливають на розсіювання світла?
4. Які основні методи та підходи до багаточастинкового розсіювання електромагнітного випромінювання ви описали?
5. Яка важлива роль розсіювання електромагнітного випромінювання в дослідженні взаємодії іонізуючого випромінювання з речовиною?
6. Які два основних компоненти багатократного розсіювання вказані в тексті, і чим вони відрізняються від розсіювання на одній частинці?
7. Які методи та підходи до моделювання багатократного розсіювання електромагнітного випромінювання описані в тексті?
8. Як розглядається розсіювання на окремих сферах, які утворюють непоглинаюче однорідне середовище?
9. Яка роль кутових та орієнтаційних параметрів системи розсіювача, і як вони впливають на розсіювання електромагнітного випромінювання?
10. Які переваги використання гранульованих матеріалів для захисту від радіації та які їхні властивості допомагають уникнути проблем пов'язаних з експлуатацією?

## ВИКОРИСТАНІ ДЖЕРЕЛА

1. Principles of Optics: Electromagnetic Theory of Propagation, Interference and Diffraction of Light / Born M., Wolf E. et al. Cambridge University Press, 1999. 952 p. ISBN-13 : 978-0521642224
2. Jackson J. D. Classical Electrodynamics. John Wiley & Sons Inc., 1999. 834 p.
3. Griffiths D. J. Introduction to electrodynamics. Prentice Hall Upper Saddle River, New Jersey, 2012. 596 p. ISBN 0-13-805326-X
4. Lorrain P., Corson D., Lorrain F. Electromagnetic Fields and Waves. W. H. Freeman and Company, New York, 1988. 754 p. ISBN-13 : 978-0716718239
5. Hayt W. H., Buck J. A. Engineering Electromagnetics. Blacklick, Ohio, U.S.A.: McGraw-Hill Science Engineering, 2005. 608 p. ISBN-13 : 978-0071244497
6. Glyva V., Panova O., Voloshkina O. Methodological principles of electromagnetic screens application for public protection from electromagnetic fields and radiation. *Environmental Problems*. 2016. Vol. 1, N. 1. P. 69-72.
7. Кучерук І. М., Горбачук І. Т., Луцик П. П. Загальний курс фізики. Том 3. Електрика і Магнетизм: навчальний посібник. Київ : "ТЕХНІКА", 2001. 229 с.
8. Корнійчук В. М., Романовський О. А. Електродинаміка: підручник. Київ: "Літера ЛТД", 2020. 400 с.
9. Семиноженко В. П. Фізика. Електродинаміка та спеціальна теорія відносності. Київ: "Літера ЛТД", 2019. 320 с.
10. Гринько О. М. Електродинаміка. Київ: "Кондор", 2018. 240 с.
11. Бондаренко І. О. Основи електродинаміки. Київ: "Кондор", 2018. 280 с.
12. Про забезпечення санітарного і епідеміологічного благополуччя населення: Закон України від 07.02.02 № 3037-III URL: <http://zakon0.rada.gov.ua/laws/show/4004-12>. (дата звернення 22.06.2022)
13. Про захист прав споживачів: Закон України № 1024-XII від 12.05.91, URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1023-12#Text> (дата звернення 12.08.2023)
14. Про затвердження державних санітарних правил та норм: Наказ №239 Міністерства охорони здоров'я від 01.08.1996

- URL:<https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0488-96#Text> (дата звернення 12.08.2023)
- 15.ICNIRP URL: <https://www.icnirp.org/cms/upload/publications/ICNIRPstatgdl.pdf> (дата звернення 11.08.2023)
  - 16.ICNIRP URL: <https://www.icnirp.org/cms/upload/publications/ICNIRPFactSheetStatic.pdf> (дата звернення 11.08.2023)
  - 17.ICNIRP URL: <https://www.icnirp.org/cms/upload/publications/ICNIRPMR2009.pdf> (дата звернення 11.08.2023)
  - 18.ICNIRP URL: <https://www.icnirp.org/en/frequencies/static-electric-fields-0-hz/index.htm> (дата звернення 11.08.2023)
  - 19.ICNIRP URL: <https://www.icnirp.org/cms/upload/publications/ICNIRPrgdl2020.pdf> (дата звернення 11.08.2023)
  - 20.Посібник для пошукувачів рівня підготовки доктор філософії за спеціальністю Технології захисту навколишнього середовища : навчальний посібник / Герасимов О. І., Андрианова І. С., Курятников В. В., Співак А. Я. Одеса: Одеський державний екологічний університет, 2021. 213с. ISBN 978-966-186-180-9 <http://eprints.library.odeku.edu.ua/id/eprint/9742>
  - 21.Герасимов О. І. Радіоекологія за галузями : підручник. Одеса: ТЕС, 2016. 100 с.
  22. Герасимов О. І., Худинцев М. М., Клименков О. А. Новітні матеріали і технології в задачах захисту систем навколишнього середовища : монографія. Одеса: ОДЕКУ, 2021. 78 с.
  - 23.Технології радіаційного захисту з використанням гранульованих матеріалів / Герасимов О.І. та ін. *Фізика аеродисперсних систем*. 2021. № 59. С. 194-200. <https://doi.org/10.18524/0367-1631.2021.59.227384>.
  - 24.Герасимов О. І. Технології захисту навколишнього середовища: підручник. Одеса: ТЕС, 2019. 268с.
  - 25.Герасимов О. І. Радіоекологія за галузями: підручник. Одеса: ТЕС, 2016. 100с.
  - 26.Герасимов О. І. Теоретичні основи технологій захисту навколишнього середовища: навчальний посібник. Одеса: ТЕС, 2018. 228 с.
  - 27.Герасимов О. І. Елементи фізики довкілля : навчальний посібник. Одеса: ТЕС, 2004. 144 с.
  - 28.Герасимов О. І., Сідлецька Л. М. Розповсюдження плоскої хвилі в

неоднорідному одновимірному силовому ланцюжку: ефект прозорості. *Екологічна безпека і природокористування*. 2022. № 41. С. 102-110.

29. Концептуальні питання освітньо-професійної підготовки фахівців з спеціальності «Технології захисту навколишнього середовища» / Андріанова І. С., Герасимов О. І., Курятников В. В., Співак А. Я. *Фізика аеродисперсних систем*. 2021. № 59. С. 184-193. <https://doi.org/10.18524/0367-1631.2021.59.227380>
30. Винников В. В. Основы проектирования РЭС. Электромагнитная совместимость и конструирование экранов: учеб. пособие. СПб.: Изд-во СЗТУ, 2006. 164 с.



## ПРЕДМЕТНИЙ ПОКАЖЧИК

Анізотропні середовища	20	Мазер	15,16
Брюстера кут	22	Максвелла рівняння	8
Борна теорія	44	Мікрохвилі	13
Бесселя функція	49	Мі теорія	45,58
Видиме світло	14	Хвильовий опір діелектрика	40
Гранульовані матеріали	47	NIR	28
Гамма-випромінювання	14	Поляризація	22
Діелектрик	22	Розсіювальний потенціал	44
Ефективність	39	Радіохвилі	13
Ефективний радіус	40	Резонансна частота	29
Екрани захисні	37	РЧ ЕМП	29
Закон України	42	Рентгенівські промені	14
Зміщення струм	8	Селективність	27
Ізотропні середовища	20	Снелліуса закон	21
Інфрачервоне світло	13	Стандарт ICNIRP	28
Кут падіння	21	Стандарт SAR	17
Кут заломлення	21	Пойтинга вектор	10
Коефіцієнти Гаунта	52	Ультрафіолет	14
Лежандра поліноми	49	Френеля формули	22
Лазер	15	Ханкеля функція	51
		Хвильові рівняння	9

Навчальне електронне видання

ГЕРАСИМОВ Олег Іванович  
ХУДИНЦЕВ Микола Миколайович  
КУДАШКІНА Лариса Сергіївна

**ФІЗИЧНІ ОСНОВИ ЕЛЕКТРОМАГНІТНОГО ЗАБРУДНЕННЯ  
НАВКОЛИШНЬОГО СЕРЕДОВИЩА**

Навчальний посібник

**Видавець і виготовлювач**

Одеський державний екологічний університет

вул. Львівська, 15, м. Одеса, 65016

тел./факс: (0482) 32-67-35

Е-mail: [info@odeku.edu.ua](mailto:info@odeku.edu.ua)

Свідоцтво суб'єкта видавничої справи

ДК № 5242 від 08.11.2016