



**Міністерство освіти і науки України**

**ДЕРЖАВНИЙ БІОТЕХНОЛОГІЧНИЙ  
УНІВЕРСИТЕТ**

**Факультет енергетики, робототехніки та  
комп'ютерних технологій**

**Кафедра електромеханіки, робототехніки,  
біомедичної інженерії та електротехніки**

**ВЗАЄМОДІЯ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ ПОЛІВ  
З БІОЛОГІЧНИМИ ОБ'ЄКТАМИ**

**Методичні вказівки  
до виконання практичної роботи**

**для здобувачів першого (бакалаврського) рівня вищої освіти денної та  
(заочної) форми навчання, спеціальності  
163 «Біомедична інженерія»**

**Харків  
2024**

Міністерство освіти і науки України  
ДЕРЖАВНИЙ БІОТЕХНОЛОГІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
Факультет енергетики, робототехніки та комп'ютерних технологій  
Кафедра електромеханіки, робототехніки, біомедичної інженерії та  
електротехніки

ВЗАЄМОДІЯ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ ПОЛІВ  
З БІОЛОГІЧНИМИ ОБ'ЄКТАМИ

Методичні вказівки  
до виконання практичної роботи

для здобувачів першого (бакалаврського) рівня вищої освіти денної та  
(заочної) форми навчання, спеціальності  
163 «Біомедична інженерія»

Затверджено  
рішенням Науково-методичної  
ради факультету ЕРКТ  
Протокол № 1 від 31 жовтня 2023 р.

Харків  
2024

УДК 681.5 : 631.1(072)

Схвалено  
на засіданні кафедри електромеханіки, робототехніки, біомедичної інженерії  
та електротехніки  
Протокол № 2 від 31 вересня 2023 р.

Взаємодія електромагнітних полів з біологічними об'єктами : метод. вказівки до виконання практ. роботи для здобувачів першого (бакалаврського) рівня вищої освіти денної (заочної) форми навч., спец. 163 «Біомедична інженерія» / Державний біотехнологічний університет; уклад.: В. О. Шигимага, Н. Г. Косуліна, М. О. Чорна, Г. А. Ляшенко, В. В. Сухін, К. С. Коршунов. – Харків: [б. в.], 2024. – 29 с.

Методичні вказівки включають практичну роботу та список літератури. Матеріал розкриває фізичні основи взаємодії ЕМП з біооб'єктами, сутність впливу параметрів електромагнітного поля на біооб'єкти, умови захисту їх та деякі експериментальні дослідження біологічних ефектів ЕМП.

Видання призначене здобувачам першого (бакалаврського) рівня вищої освіти денної форми навчання спеціальності 163 Біомедична інженерія.

### **Рецензент:**

Мороз О. М. – доктор технічних наук, професор кафедри енергетики та енергетичного менеджменту Державного біотехнологічного університету.

Аврунін О. Г. – доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри біомедичної інженерії Харківського національного університету радіоелектроніки.

© Шигимага В.О., Косуліна Н. Г., Чорна м. О.,  
Ляшенко Г. А., Сухун В. В., Коршунов К. С. 2024  
© ДБТУ, 2024

## Практична робота № 3

### ВЗАЄМОДІЯ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ ПОЛІВ З БІОЛОГІЧНИМИ ОБ'ЄКТАМИ

**1. МЕТА РОБОТИ:** Розглянути природні та штучні джерела ЕМП в середовищах існування живих організмів, фізичні основи взаємодії ЕМП з біооб'єктами, експерименти з визначення біологічних ефектів ЕМП та допустимі дози.

#### 2. ЗАГАЛЬНІ ПОЛОЖЕННЯ

Все різноманіття живого на нашій планеті виникло, еволюціонувало і нині існує завдяки безперервній взаємодії з різними факторами зовнішнього середовища, пристосовуючись до їхнього впливу та змін, використовуючи їх у процесах життєдіяльності. Більшість цих факторів мають електромагнітну природу. Протягом усієї епохи еволюції живих організмів електромагнітні випромінювання існують в середовищі їх проживання – біосфері. Вчені послідовно виявляли нові природні електромагнітні випромінювання в різних діапазонах електромагнітного спектра. До діапазону сонячних випромінювань, що давно вже випромінювався - від інфрачервоних до ультрафіолетових променів - додався діапазон іонізуючих випромінювань (рентгенівських і гамма променів) космічного і земного походження. В іншій, більш низькочастотній частині електромагнітного спектру, слідом за виявленням повільних періодичних змін (сезонних, місячних, добових) магнітного та електричного полів Землі, були відкриті короткоперіодні коливання магнітного поля Землі з частотами, що тягнуться до сотень герц. А випромінювання атмосферних розрядів показало, що електромагнітні випромінювання, що виникають при цьому, охоплюють широкий діапазон довжин хвиль – від наддовгих до ультракоротких; і нарешті, були відкриті радіовипромінювання Сонця та галактик у діапазоні від метрових до міліметрових хвиль. Електромагнітні поля та випромінювання буквально пронизують всю біосферу Землі, тому можна вважати, що всі діапазони природного електромагнітного спектру відіграли якусь роль в еволюції організмів, і що це якось відбилося на процесах їхньої життєдіяльності.

Проте з розвитком цивілізації існуючі природні поля доповнилися різними полями та випромінюваннями антропогенного походження і це теж зіграло, а точніше продовжує відігравати важливу роль у розвитку всього живого на Землі. Всі ми бачили в лісі павутину, зіткану майстерним ткачем-павуком, і комах, що борсаються в ній. На відміну від павуків, людина створила за допомогою радіотехнічних та радіоелектронних приладів невидиме електромагнітне павутиння, в якому всі ми "борсаємось", не підозрюючи про

це. Особливо сильно вона розрослася останніми роками. Потужні лінії електропередачі високої та надвисокої напруги, не менш потужні та численні радіо- та телепередавальні станції, космічні ретранслятори – всі ці маленькі та гігантські павуки плетуть навколо нас свої невидимі павутиння з електромагнітних полів. І чим більше ми оточуємо себе цією «павутиною», тим важливішим стає для нас дізнатися про те, як діють на все живе створені природою та нами самими електромагнітні поля.

Для спектра, де  $h\nu > kT$  (при температурах, властивих живим організмам), тобто від інфрачервоного діапазону до гамма променів, всі види біологічної активності тією чи іншою мірою вже виявлено. Інакше було з рештою великої області електромагнітного спектру, де  $h\nu < kT$ ; ця область включає діапазони від надвисокочастотного до інфранізкочастотного, аж до "нульової частоти" (постійних електричних та магнітних полів). (Для зручності викладу ми далі називатимемо всю цю область спектру "електромагнітними полями" або ЕМП). Загалом проблема біологічної активності ЕМП почала формуватися лише останніми роками, хоча дослідження окремих аспектів цієї проблеми ведуться вже давно.

ЕМП тривалий час вважали такими, що не надають будь-якого впливу на живі організми. До такого висновку приводили прості фізичні міркування: оскільки кванти енергії в цій галузі спектра значно менше середньої кінетичної енергії молекул ( $h\nu \ll kT$ ), то поглинання ЕМП у живих тканинах може бути пов'язане лише з посиленням обертання молекул як цілого, тобто з перетворенням електромагнітної енергії на теплову, а поглинання енергії постійного або повільно змінного електричного та магнітного полів – з орієнтацією молекул. Розрахунки показували, що скільки-небудь значимих для організму теплових ефектів ЕМП очікується лише при дуже високих інтенсивностях – близько  $10^2$  В/м для надвисоких частот і до  $10^6$  В/м для інфранізких, тобто при напруженості, що набагато порядків перевищують значення напруженостей природних ЕМП біосфери. Що стосується біологічно значущого ефекту орієнтації молекул під дією постійних або полів, що повільно змінюються, то такий ефект можливий, якщо енергія взаємодії поля з молекулою не менше  $kT$ . Для цього напруженість магнітного поля повинна бути не нижче  $10^3$  Е та електричного – не нижче  $10^5$  В/м, що на кілька порядків вище напруженості магнітного та електричного полів Землі. Виходячи з цих уявлень про умови можливих енергетичних взаємодій ЕМП з тканинами живих організмів, фізики скептично ставилися до повідомлень біологів, що з'являлися час від часу, про реакції тварин і людини на ЕМП, значно слабші, ніж це вимагалось для теплового ефекту.

Але попри ці категоричні висновки біологи продовжували спроби експериментально виявити біологічну дію ЕМП і постійного магнітного поля при напруженості значно нижчих, ніж це впливало з теоретичних оцінок.

Біологічні дослідження показали, що організми різних видів - від одноклітинних до людини – чутливі до постійного магнітного поля і ЕМП різних частот при енергії на десятки порядків нижче теоретично оціненої. Різні реакції організмів на ЕМП виникають при їх інтенсивності, яка в тисячі, сотні

тисяч і навіть мільйони разів нижче, ніж це впливає з теоретичних уявлень про енергетичний характер біологічних ефектів ЕМП. Особливо висока чутливість до надслабких ЕМП, що багаторазово повторюються, тобто має місце кумулятивний вплив на організми. У повному вигляді висока чутливість до ЕМП проявляється лише у цілісних організмів; вона значно нижча у ізольованих органів і клітин та ще нижче у білкових розчинів.

Якщо частотні та модуляційно-часові параметри ЕМП істотно відрізняються від природних, то реакції організмів виникають при більш високих інтенсивностях ЕМП, але все ж таки значно менших, ніж теоретично передбачуваних. У цих умовах реакції мають характер різних порушень регуляції фізіологічних функцій – ритму серця, кров'яного тиску, обмінних процесів тощо. пригніченого до подібного до епілептичного). Особливо яскраво виражені порушення спостерігаються у регуляції процесів розвитку. Різкі порушення спостерігаються при патологічних станах організму.

Характер та виразність біологічних ефектів ЕМП своєрідно залежать від параметрів останніх. В одних випадках ефекти максимальні при деяких «оптимальних» інтенсивностях ЕМП, в інших – зростають при зменшенні інтенсивності, у третіх – протилежно спрямовані за малих та великих інтенсивностей. Що ж до залежності від частот і модуляційно-часових характеристик ЕМП, вона має місце для специфічних реакцій (умовні рефлекси, зміни орієнтації, відчуття). Все ж таки види порушень регуляції процесів життєдіяльності під дією ЕМП практично не залежать від цих параметрів.

Аналіз цих емпіричних закономірностей приводить до висновку, що біологічні ефекти слабких полів, незрозумілі за їх енергетичною взаємодією з речовиною живих тканин, можуть бути обумовлені інформаційними взаємодіями ЕМП з кібернетичними системами організму, що сприймають інформацію з навколишнього середовища і відповідно регулюють процеси життєдіяльності.

Таким чином, ми постулюємо, що у процесі еволюції жива природа використовувала природні ЕМП довкілля як джерела інформації, що забезпечувала безперервне пристосування організмів до змін різних чинників довкілля – узгодження процесів життєдіяльності з регулярними змінами, захист від спонтанних змін. Це привело до використання ЕМП як носіїв інформації, що забезпечує взаємозв'язок на всіх рівнях ієрархічної організації живої природи – від клітини до біосфери. Формування в живій природі інформаційних зв'язків за допомогою ЕМП на додаток до відомих видів передачі за допомогою органів чуття, нервової та ендокринної систем було обумовлено надійністю та економічністю «біологічного радіозв'язку».

### 3. ПРИРОДНІ ТА ШТУЧНІ ДЖЕРЕЛА ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ ПОЛІВ У МІСЦЯХ ПРОЖИВАННЯ ОРГАНІЗМІВ

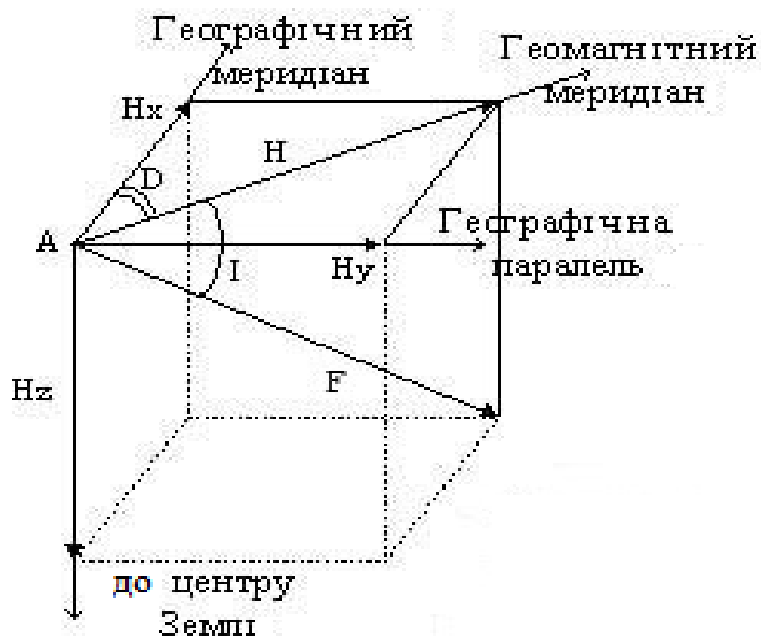
#### Електричне поле Землі

В атмосфері Землі існує електричне поле ( $E_z$ ), спрямоване вертикально до земної поверхні так, що ця поверхня заряджена негативно, а верхні шари атмосфери – позитивно. Напруженість цього поля залежить від географічної широти: вона максимальна в середніх широтах, а до екватора і полюсів спадає. Зі збільшенням відстані від поверхні Землі  $E_z$  спадає приблизно за експоненціальним законом (прибл. 5 В/м на висоті 9 км).

Величина  $E_z$  відчуває періодичні річні і добові зміни. Добові зміни носять як загальнопланетарний, так і місцевий характер. Над різними за широтою областями океану і в полярних областях добова зміна відбувається за єдиним універсальним часом і називається унітарною варіацією. Ця варіація пов'язана з сумарною грозовою діяльністю по земній кулі, що зазнає такі ж добові зміни. Над іншими областями суші добова зміна пов'язана ще й з місцевою грозовою діяльністю і може значно варіювати в залежності від пори року.

#### Магнітне поле Землі

Магнітне поле Землі розподілено, як показано на малюнку:



Прийнято характеризувати це поле чотирма параметрами – горизонтальної складової напруженості ( $H$ ), вертикальної складової ( $Z$ ), кутом нахилу  $I$  і кутом відміни  $D$ . Величина  $n$  максимальна у екватора 0,3...0,4  $E$  і

убуває до полюсів до сотих часток Ерстеда;  $Z$  зменшується від 0,6...0,7  $E$  у полюсів, майже до нуля у екватора. В областях магнітних аномалій значення  $Z$  можуть бути набагато вищими (або нижчими), ніж у сусідніх районах.

Елементи земного магнетизму відчувають тимчасові варіації – зміна магнітної активності. Ці зміни вимірюють в одиницях  $\gamma = 10^5$  е і оцінюють або по  $K$ -індексами від 0 до 9 (згідно зміни амплітуди напруженості в середньому від 4 до  $500\gamma$ , або  $u$ -мірою, що обчислюється за формулою:

$$u = \frac{0,1\Delta H}{\cos\Phi \cos(\Psi - D)}$$

де  $\Delta H$  – середнє значення зміни  $H$  в одиницях  $\gamma$ ,  $\Phi$  – геомагнітна широта,  $\Psi$  – кут між геомагнітним і географічним меридіаном,  $D$  – кут схиляння.

Варіації, що носять на перший погляд довільний характер, отримали назву магнітних збурень, або (при великих змінах) магнітних бур. Ці збурення зустрічаються в трьох формах: синфазні – з'являються спорадично і протікають одночасно по всій планеті, локальні – обмежені певною областю біля поверхні Землі, і перманентні – спостерігаються безперервно в деяких областях земної поверхні. При синфазних і локальних магнітних найбільш сильно зростає.

Напруженість горизонтальної складової геомагнітного поля – до декількох тисяч  $\gamma$ . Постійні варіації – до сотень  $\gamma$  – спостерігаються безперервно протягом дня, незалежно від загальної величини магнітної активності.

Всі ці види магнітної активності є результатом сонячної активності, пов'язаної як зі збільшенням числа сонячних плям, так і зі спалахами на сонці. Тому варіації магнітної активності носять відповідний періодичний характер.

Нарешті, є група магнітних збурень періодичного характеру, які називають короткоперіодними коливаннями (або мікропульсаціями магнітного поля).

Періоди цих коливань охоплюють діапазон від сотих часток секунди до декількох хвилин, а амплітуди змін не перевищують декількох одиниць  $\gamma$ . Т.ч., загальний частотний спектр періодичних змін геомагнітного поля займає інтервал від  $10^{-5}$  до сотень герц.

## Атмосферики

Атмосфериками називають ЕМП, створювані атмосферними розрядами. Частотний діапазон атмосфериків широкий, від сотень герц до десятків мегагерц. Їх інтенсивність максимальна на частотах поблизу 10 кГц і убуває в міру зростання частоти. У районах, близьких до місць грозових розрядів, напруженості електричної складової ЕМП атмосфериків – близько десятків, сотень і навіть тисяч В/м на частотах, близьких до 10 кГц.

Основними осередками атмосфериків є континенти тропічного поясу, а до високих широт інтенсивність грозової діяльності убуває.



Відома добова і сезонна періодичність грозової діяльності. Гроза діяльність пов'язана також з сонячною активністю: під час спалахів на сонці атмосферики значно посилюються.

### **Радіовипромінювання Сонця і галактик**

Частотний діапазон радіовипромінювання Сонця і галактик досить широкий – від 10 МГц до 10 ГГц. Інтенсивність сонячного радіовипромінювання безпосередньо пов'язане з сонячною активністю. Потік радіовипромінювань з галактик на частоті 100 МГц становить по порядку величини  $\text{Вт/м}^2/\text{МГц}$ .

Інтенсивність цих радіовипромінювань змінюється з добовою періодичністю, що пов'язано з обертанням Землі щодо джерел випромінювань. Крім того, радіовипромінювання змінюються за інтенсивністю з періодичністю 27...28 днів, пов'язаною з обертанням Сонця, і, нарешті, з 11-річною періодичністю сонячної активності.

### **ЕМП в околиці генераторів різних частотних діапазонів**

З розвитком електроенергетики, радіо – і телевізійної техніки з'явилася велика кількість різноманітних джерел ЕМП.

У діапазоні від низьких до ультрависоких частот електромагнітні поля в околицях генераторів слід розглядати як поля індукції, а не як потік випромінювання радіохвиль. Поля індукції швидко послаблюються в міру віддалення від джерела і за межами околицями радіусом в кілька довжин хвиль (де і розташовані найчастіше робочі місця обслуговуючого персоналу) напруженості ЕМП складають вже незначну частку від їх початкових величин.

ЕМП промислової частоти (50 Гц) виникають у ліній електропередач, трансформаторів і т.п. у безпосередній близькості від цих джерел напруженості ЕМП можуть бути і досить значними (до декількох тисяч В/м).

Високочастотні ЕМП – від десятків до сотень кілогерц – найбільш інтенсивні поблизу промислових генераторів для високочастотного гарту металів, сушіння деревини і т. п. у цих умовах Е може досягати на робочих місцях значень тисяч В/м, а Н – десятків А/м.

Ультрависокочастотні ЕМП – від декількох МГц до десятків МГц – найбільш інтенсивні в робочих приміщеннях радіо-і телевізійних станцій, де напруженості Е доходять до сотень В/м.

Надвисокочастотні ЕМП – від сотень до тисяч МГц, що виникають поблизу відповідних установок (наприклад, радіолокаційних), оцінюються вже

по щільності потоку потужності, значення якої можуть досягати декількох МВт/см<sup>2</sup>.

## **Радіофон**

За рахунок численних радіо - і телевізійних станцій навколо земної кулі створюється своєрідний «радіофон». Оцінка інтенсивності "радіофона" і її змін у часі досить скрутна.

У районах, розташованих в околицях радіо – і телевізійних станцій, інтенсивність "радіофона" може бути досить значною – близько десятих часток В/м у віддалених районах інтенсивність "радіофона" значно нижче і основний внесок в нього вносять короткохвильові станції. Так як всі станції випромінюють некогерентно, «радіофон» являє собою результат підсумовування випромінювань.

Що стосується зміни інтенсивності "радіофона" в залежності від часу доби, то воно має місце тільки в районах першого типу, де основними джерелами "радіофона" є довгохвильові і середньохвильові станції, а також телевізійні станції, що працюють в метровому діапазоні. Ці станції, як правило, припиняють роботу в період приблизно від 1 години до 6 години ранку. Короткохвильові ж станції, що ведуть передачі по всій земній кулі, працюють практично цілодобово.

Загальне уявлення про рівень інтенсивності "радіофона" може дати порівняння його з рівнем атмосферних перешкод. Вважають, що рівень радіосигналів в 10...100 разів вище рівня перешкод.

## **4. ФІЗИЧНІ ОСНОВИ ВЗАЄМОДІЇ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ ПОЛІВ З БІОЛОГІЧНИМИ ОБ'ЄКТАМИ**

### **Біологічні об'єкти в електростатичному полі**

У тканинах живих організмів, що знаходяться в електростатичному полі, індукуються електричні заряди на поверхнях розділу середовищ з різними електричними параметрами, а також відбувається поляризація пов'язаних зарядів. При цьому допущенні можна оцінити розподіл заряду. Індукованого на поверхні тіла, виходячи з формул, виведених для провідних тіл простих геометричних форм, що знаходяться в електричному полі. Наприклад, тіло людини можна розглядати як гомогенний провідний еліпсоїд.

Хілл теоретично розглянув можливий механізм взаємодії електростатичного поля з макромолекулами тканин. Електричне поле викликає поляризацію макромолекул в розчині, обумовлену як наявністю постійного дипольного моменту у молекул, так і зміною розташування протонів в молекулі. Така дія може впливати на відносну стабільність двох можливих конфігурацій макромолекул. На основі цих міркувань автор робить висновок, що під дією полів напруженістю близько  $10000 \text{ в/см}$  може відбутися поділ ланцюгів ДНК (перехід від спареного стану до неспареного), а це може послужити пусковим механізмом для поділу хромосом в клітинному ядрі, що передуює поділу клітини. Інша можливість – вплив поля на стан білкових ланцюгів в м'язових волокнах (перехід від довгого ланцюга до короткого), що може служити пусковим механізмом для м'язового скорочення.

### **Біологічні об'єкти в магнітостатичному полі**

Постійне магнітне поле в принципі може впливати на різні процеси в біологічних об'єктах: налічують до 20 можливих видів такого роду взаємодій. Зроблено чимало спроб теоретичного розгляду основних фізичних механізмів біологічних ефектів магнітного поля та оцінки величин напруженості поля, при яких можливі такі ефекти. Ці теоретичні дослідження можна розділити на дві основні групи залежно від того, які ефекти магнітного поля (мікроскопічні чи макроскопічні) в них розглядаються.

У першій групі досліджень початкове припущення полягає в тому, що механізми біомагнітних ефектів обумовлені фізичними явищами, що виникають на молекулярному і навіть на атомному рівні. Так, одні автори бачать основну причину біомагнітних ефектів в орієнтації діамагнітних або парамагнітних молекул під дією магнітного поля, інші припускають, що це поле може викликати спотворення валентних кутів в молекулах, треті звертають увагу на орієнтацію спінів молекул в магнітному полі і т. п.

Нещодавно було висловлено припущення, що в молекулах води, поміщеної в магнітне поле, можуть відбуватися орто-пара переходи. Необхідна для цього магнітна енергія (в розрахунку на молекулу) досить невелика –

наприклад, в сотні разів менше, ніж для розривів слабких водневих зв'язків в молекулі. В результаті орто-пара переходів у водних розчинах можуть виникати області з паралельною орієнтацією спінів, що призведе до виштовхування з таких областей розчинених речовин.

Макроскопічні механізми біомагнітних ефектів розглядалися на різних моделях. Розраховано, що в магнітному полі з напруженістю  $3 \cdot 10^5$  Е еритроцити повинні обертатися зі швидкістю 68 град/хв, тобто вдвічі швидше, ніж за рахунок теплового руху, проте встановлення рівноважного стану в такому ефекті буде вельми повільним. Більш імовірний ефект виникнення градієнта електричного потенціалу в кровоносних судинах під дією магнітного поля (магнітоелектричний ефект). Наприклад, в аорті при швидкості кровотоку 100 см/с під дією магнітного поля напруженістю 500 Е буде індукуватися електричне поле з градієнтом 0,14 мВ/см, а при напруженості  $5 \cdot 10^5$  Е – поле з градієнтом 5 мВ/см, що можна порівняти вже з чутливістю нервових клітин, що становить 10 мВ/см.

З позицій магнітомеханічних явищ розглядалися також пульсуючі тиску, які можуть виникати в тканинах організмів при взаємодії магнітного поля з біотоками, частоти яких варіюють від 10 до  $2 \cdot 10^3$  імпл/с. За розрахунками, при напруженості поля  $10^2 \dots 10^3$  Е на ділянках, де протікають біотоки, можуть виникати пульсуючі пондеромоторні сили, які чинять тиск порядку  $10^{-6} \dots 10^{-1}$  дин/см<sup>2</sup>. Чутливість людського вуха ( $10^{-4}$  дин/см<sup>2</sup>) знаходиться якраз в цих межах. Передбачається можливість резонансних ефектів такого роду, коли частота вимушених механічних коливань в даній ділянці організму (або органу) збігається з власною частотою його вільних коливань. В цьому випадку магнітомеханічний ефект може бути істотним і при досить малих напруженості поля, наприклад в геомагнітному полі.

Більшість авторів, виходячи з теоретичних міркувань і розрахунків, заснованих на мікроскопічних і макроскопічних концепціях, приходять до висновку, що біомагнітні ефекти можливі тільки при досить високих напруженостях поля – принаймні, в тисячі ерстед.

### **Поглинання енергії ЕМП в тканинах і перетворення її в теплову**

Механізм перетворення в живих тканинах енергії ЕМП в теплову вважали єдиною можливою причиною будь-яких біологічних ефектів, що викликаються ЕМП від низьких частот до надвисоких. На цій основі були розроблені і набули широкого поширення методи застосування ЕМП високих, ультрависоких і надвисоких частот для лікування різних захворювань. Виходячи з цієї концепції, намагалися оцінювати гранично допустимі інтенсивності ЕМП радіочастот при вивченні їх професійної шкідливості.

Теплова концепція біологічних ефектів ЕМП суперечить результатам ряду досліджень, проведених з ЕМП слабких інтенсивностей. Однак в тих випадках, коли біологічні об'єкти піддаються впливу ЕМП досить високих інтенсивностей (при яких тепловий ефект вже можливий), вона представляється

корисною. Тому ми детально розглянемо теоретичні та експериментальні дані про теплові ефекти ЕМП різних частот.

У низькочастотному і високочастотному діапазонах перетворення енергії ЕМП в теплову пов'язано в основному з втратами провідності, що виникають за рахунок виділення, в тканинах джоулева тепла індукованими в них іонними струмами.

До частот порядку 10 МГц розміри тіла людини і великих тварин (а тим більше дрібних) малі в порівнянні з довжиною хвилі, а тканини тіла можна розглядати як провідне середовище. Тому виконуються умови квазістаціонарності і розрахунки можна проводити як для статичного поля; потужність ЕМП, що поглинається в одиниці об'єму тіла, може бути в цьому випадку обчислена за законами постійного струму:

$$P = i^2 \rho \quad (\text{Вт/см}^3)$$

Величину щільності струму  $i$  слід обчислювати стосовно до форми та електричних параметрів біологічного об'єкта. Такий розрахунок для людини, що знаходиться в змінному електричному або магнітному полі в діапазоні частот від 100 кГц до 1 МГц, зроблений при наступних припущеннях:

1. Тіло людини наближено розглядається як гомогенний (по електричним властивостям) провідник еліпсоїд;

2. Розглядається тільки однорідне електричне або магнітне поле, в якому тіло (еліпсоїд) розташоване так, що його Велика Вісь паралельна силовим лініям.

При цих умовах щільність струму в разі електричного поля дорівнює:

$$i_e = 1,3 \cdot 10^{-13} f E \quad (\text{В/см}^2),$$

а в разі магнітного поля:

$$i_H = 1,3 \cdot 10^{-11} f H \quad \text{А/см}^2$$

( $E$  виражено в В/м,  $H$  – в А/м,  $f$  – в Гц).

Кількість тепла, що виділяється при цьому в тілі людини, буде визначатись із співвідношень:

$$Q_E = 2 \cdot 10^{-20} \rho_{cp} f^2 E^2 \quad \text{кал/хв}$$

$$Q_H = 2 \cdot 10^{-16} \rho_{cp} f^2 H^2 \quad \text{кал/хв}$$

( $\rho_{cp}$  – середній питомий опір тканин тіла людини).

У діапазонах ультрависоких і надвисоких частот перетворення енергії ЕМП в теплову пов'язано вже не тільки з втратами провідності, але і з діелектричними втратами. При цьому частка діелектричних втрат в загальному поглинанні енергії ЕМП в тканинах зростає з частотою. Наприклад, втрати, пов'язані з релаксацією молекул води в тканинах, при частоті 1 ГГц становлять

близько 50% від загальних втрат, при частоті 10 ГГц – близько 90% і при частоті 30 ГГц – близько 98%.

У цих частотних діапазонах (вище 100 МГц) розміри тіла людини і великих тварин вже порівнянні з  $\lambda$  або перевищують її, а тканини тіла вже не можна розглядати як провідне середовище; нарешті, не можна вважати різні тканини гомогенними за електричними властивостями. Інакше кажучи, умова квазістаціонарності тут не виконується і необхідно розглядати потік хвиль, частина якого відбивається від поверхні тіла, а інша частина поступово поглинається в електрично негомогенних тканинах.

З урахуванням відображення потужність ЕМП, що поглинається на  $1 \text{ см}^2$  поверхні об'єкта, або діюча потужність ( $P_d$ ) буде дорівнювати

$$P_d = P_o (1 - K),$$

де  $P_o$  – щільність потоку потужності, що падає на поверхню об'єкта,  $K$  – коефіцієнт відбиття.

Значення коефіцієнта відображення ЕМП різних частот від різних тканин при різних частотах і глибина проникнення енергії ЕМП в глиб тканин (тобто глибина, на якій енергія зменшується в  $e$  раз) наведені в таблицях.

Коефіцієнт відбиття від меж розділу між тканинами при різних частотах

	Частота, МГц							
Межи розділу	100	200	400	1000	3000	10000	24 500	35000
Повітря — шкіра	0,758	0,684	0,623	0,570	0,550	0,530	0,470	
Шкіра — жир	0,340	0,227	—	0,231	0,190	0,230	0,220	—
Жир — м'язи	0,355	0,352	0,3004	0,261	—	—	—	—

Глибина проникнення електромагнітних хвиль в різні тканини, см

	Частота, МГц							
Ткань	100	200	400	1000	3003	10000	24000	35 000
Кісний мозок	22,9	20,66	18,73	11,9	9,924	0,34	0,145	0,073
Головний мозок	3,56	4,132	2,072	1,933	0,476	0,168	0,075	0,0378
Кристалик ока	9,42	4,39	4,23	2,915	0,500	0,174	0,070	0,0378
Скловидне тіло	2,17	1,69	1,41	1,23	0,535	0,195	0,045	0,0314
Жир	20,45	12,53	8,52	6,42	2,45	1,1	0,342	---
М'язи	3,451	2,32	1,84	1,456	---	0,314	---	
Цільна кров	2,86	2,152,15	1,7871,787	1,40	0,78	0,148	0,0598	0,0272

Шкіра	3,765	2,78	2,18	1,638	0,646	0,189	0,072	---
							2	

Залежність ступеня поглинання енергії ЕМП в біологічному об'єкті від розмірів останнього можна оцінити з розрахунків для напівпровідникової сфери. З них випливає, що при  $R > \lambda$  в напівпровідниковій сфері поглинається приблизно 50% потужності, що падає на поперечний переріз, незалежно від активної провідності речовини сфери. Розрахунки та експерименти на моделях показали, що це справедливо для біологічних об'єктів будь-якої форми в діапазоні частот від 300 МГц до 3 ГГц. Але при  $R < \lambda$  поглинається потужність залежить від електричних параметрів об'єкта і при деяких значеннях  $r/\lambda$  в ньому поглинається більше енергії, ніж падає на поперечний переріз.

Залежність характеру поглинання від анатомічного розташування тканин визначається головним чином товщиною підшкірного жирового шару і способом прикладання ЕМП до об'єкта. Якщо вплив проводиться шляхом приміщення об'єкта між пластинами конденсатора, то в підшкірному шарі, що має більш низькі значення відносної діелектричної проникності  $\epsilon'$  і активної провідності  $\sigma$ , ніж у глибше розташованих м'язових тканин, напруженість  $E$  буде вище, ніж в м'язах. Відповідно розподілиться і поглинається потужність ЕМП. Якщо проводиться опромінення об'єкта хвилями, то жировий шар може зіграти роль «трансформатора імпедансів» між повітряним середовищем і м'язовою тканиною, що може привести до тієї чи іншої компенсації відображення хвиль і, отже, до відповідного збільшення частки поглинається потужності. Цей ефект залежить від товщини жирового шару, товщини шару шкіри і від частоти ЕМП.

До сих пір ми не враховували ще одного фізичного процесу, від якого може залежати відносний розподіл поглинання енергії ЕМП в тканинах живих організмів, а саме виникнення стоячих хвиль, в результаті якого енергія, що поглинається в тому чи іншому шарі тканин, може значно зрости в порівнянні з випадком поширення хвиль в цій тканині. Стоячі хвилі можуть виникнути (в зв'язку з відображеннями на кордонах розділу тканин, що мають різні електричні параметри) в тих випадках, коли товщина розглянутого шару тканин порівнянна з довжиною хвилі (величина якої в свою чергу залежить від електричних параметрів тканини). З таблиці, в якій наведені значення довжин хвиль в різних тканинах, видно, що таке співвідношення можливо в шарах тканин людини і великих тварин для ЕМП з частотами вище 3 ГГц.

Довжина хвилі в тканинах при різних частотах, м

Ткань	Частота, МГц							
	100	200	400	1000	3000	10 000	24000	35 000
Кісний мозок	116,1	62,2	32,19	12,63	3,97	1,250	0,368	0,388
Головний мозок	31,7	19,4	11,16	4,97	1,74	0,595	0,200	0,201
Кристалік ока	33,15	22,3	12,53	5,28	1,75	0,575	0,200	0,201

Скловидне тіло	21,7	13,0	7,96	3,41	1,18	0,395	0,146	0,154
Жир	96,0	57,1	30,9	12,42	3,79	1,450	0,680	---
М'язи	27,65	16,3	9,41	4,09	---	0,616	---	---
Цільна кров	25,15	15,35	8,89	3,87	1,36	0,449	0,214	0,167
Шкіра	28,07	17,94	10,12	4,41	1,49	0,506	0,250	---

### Тепловий ефект ЕМП в тканинах живих організмів

Нагрівання тканин тіла тварин і загальне підвищення температури тіла під дією ЕМП залежать не тільки від величини електромагнітної енергії, що перетворюється в теплову, але в значній мірі від терморегуляторних властивостей організму.

У гомойотермних тварин (птахів і ссавців) при даній температурі тіла результуюча тепловіддача дорівнює алгебраїчній сумі теплоутворення за рахунок обмінних процесів і тепловтрат за рахунок випромінювання, а також випаровування при диханні (а у людини і при потовиділенні), як це показано на малюнку.

В інтервалі температур, при яких організм ще здатний до терморегуляції, – між точками перетину результуючої кривої з віссю абсцис – переважають тепловтрати, що веде до відновлення нормальної температури тіла.

При подальшому підвищенні температури теплообмін може стати позитивним, і температура тіла буде зростати аж до згубної.

Експерименти, проведені з фантомами, що імітують тіло тварин, показали, що зі збільшенням обсягу об'єкта потрібно все більший час для нагрівання його до заданої температури за допомогою ЕМП даної потужності. Це пояснюється, по-перше, тим, що для нагрівання більшого обсягу потрібно більше калорій, і, по-друге, тим, що при однаковій глибині проникнення енергії ЕМП в тканини частка обсягу, в якій відбувається поглинання, буде тим більше, чим менше обсяг. Наприклад, якщо ЕМП з частотою 300 МГц проникає на глибину 2,5 см (для м'язових тканин), то це означає, що у щура (діаметр тіла 5...6 см) енергія ЕМП поглинається практично у всьому тілі, а у собаки (діаметр тіла 20...25 см) – тільки в незначній поверхній частини тіла.

Було проведено більш детальне теоретичне дослідження умов нагрівання тканин тіла людини і різних тварин під дією мікрохвиль. Час, необхідний для підвищення температури тіла на  $5^\circ$  ( $\Delta T = 5^\circ$ ), обчислювали з рівняння:

$$t = \frac{GC_b \Delta T}{E + M - S_b \alpha_{ab} (\theta_{ab} + \Delta T)}$$

де  $G$  – маса тіла,  $C_b$  – питома теплоємність,  $M$  – тепло за рахунок метаболізму,  $E$  – тепло за рахунок опромінення мікрохвилями,  $S_b$  - поверхня



тіла,  $\alpha_{ab}$  – коефіцієнт теплопередачі повітря – тіло,  $\theta_{ab}$  – Початкова різниця температур повітря-тіло.

В результаті дослідники прийшли до висновку, що при дуже великих значеннях  $T$ , відповідних Малій інтенсивності опромінення, практично немає різниці в швидкості нагрівання тварин різних розмірів, але при великих інтенсивностях ( $T$  мало) тіло малих тварин нагрівається швидше.

Результати більшості досліджень залежності теплоутворення в тканинах тварин від інтенсивності і часу впливу ЕМП, а також характеру розподілу температури в тканинах були суперечливими: в одних випадках відзначалося більш значне нагрівання в глибоких тканинах в порівнянні з поверхневими, в інших – протилежний розподіл температури, в третій – наявність як позитивного, так і негативного градієнта температури в залежності від умов впливу ЕМП. Основними причинами цих розбіжностей можна вважати недосконалість дозування поглинається потужності і непорівнянність ряду умов експериментів.

Робилися спроби теоретично оцінити кількість тепла, що виділяється на заданій відстані від опромінюваної поверхні, і розрахувати відповідне підвищення температури. Однак порівняння розрахункових даних з експериментальними показало наближену відповідність тільки при малих тривалості опромінення.

Експериментальна оцінка порогових інтенсивностей ЕМП для теплового ефекту була проведена в різних частотних діапазонах при загальному і локальному впливі ЕМП на людину і тварин. Кордон теплового ефекту визначали по мінімальному підвищенню температури тіла або тканин, що не перевищує нормальних її коливань в організмі. В якості ознаки появи теплового ефекту у людини використовували також і мінімальне тепловідчуття. Було встановлено, що залежність між тепловідчуттям і потужністю ЕМП, що поглинається в тканинах (в діапазоні 20...200 МГц), виражається співвідношенням:

$$H = \lg P - a \lg P_0,$$

де  $H$  – тепловідчуття, що оцінюється за 4-бальною системою (ледь відчутне тепло, помірне тепло, інтенсивний нагрів, ледь переноситься нагрів),  $P_0$  – потужність, що поглинається, при якій відчувається ледь помітне тепло,  $P$  – дана поглинаюча потужність,  $a$  – постійна, що не залежить від частоти (хоча  $P_0$  варіює з частотою).

З результатів експерименту випливає, що порогові інтенсивності ЕМП зменшуються з підвищенням частоти. Це і зрозуміло, так як коефіцієнт поглинання електромагнітної енергії пропорційний частоті і величині електричних параметрів  $\sigma$  і  $\varepsilon$ , які в свою чергу змінюються з частотою.

На закінчення слід зазначити, що в роботах, присвячених тепловому ефекту ЕМП, неодноразово обговорювалася можливість вибіркового нагрівання

мікрочастинок в біосередовищах, що не супроводжується істотним нагріванням навколишнього їх середовища. Однак теоретичний аналіз показав, що таке вибіркоче нагрівання можливо тільки в тому випадку, якщо частинки досить великі—не менше 1 мм в діаметрі. Тому немає підстав розраховувати на виборче нагрівання мікрочастинок (клітин, бактерій) при відсутності істотного нагрівання середовища, в якій вони суспендовані.

### Нетеплові ефекти ЕМП в біосередовищах

Були проведені експериментальні та теоретичні дослідження деяких цікавих ефектів, що виникають під дією ЕМП.

Перший ефект полягає в тому, що під дією безперервних і імпульсних ЕМП високих і ультрависоких частот (1...100 МГц) суспендовані частинки вугілля, крохмалю і молока, еритроцити і лейкоцити шикуються в ланцюги, розташовані паралельно електричним силовим лініям. Для кожного типу частинок є оптимальний діапазон частот, в межах якого ефект виникає при мінімальній напруженості поля.

Теоретичні дослідження показали, що формування ланцюжків відбувається в результаті тяжіння між частинками, в яких під дією ЕМП індукуються дипольні заряди (див.).

У неполярної діелектричної середовищі (масло) цей ефект виникає і при низьких частотах і навіть в електростатичному полі, але в воді і фізіологічному розчині іони і дипольні молекули шунтують поле низької частоти і ефект можливий тільки при досить високих частотах (вище десятків МГц). Постійна часу формування ланцюжків пропорційна кубу радіуса частинок (вона дорівнює 1 с при радіусі в 1 мк). Вона мало залежить від  $E$  в слабких полях і обернено пропорційна  $E^2$  в сильних полях. В імпульсних ЕМП ефект визначається середнім значенням  $E$ .

Несиметричні частинки орієнтуються або паралельно, або перпендикулярно до напрямку силових ліній. Це залежить від співвідношення між питомою провідністю частинок і навколишнього їх середовища і від частоти ЕМП (для електричних параметрів, близьких до біологічних).

Другий ефект "діелектричне насичення" в розчинах білків та інших біологічних макромолекул під дією високоінтенсивних ЕМП надвисоких частот. Він припускає, що під дією таких полів все поляризовані бічні ланцюги макромолекул орієнтуються в напрямку електричних силових ліній і що це може призводити до розриву водневих зв'язків та інших вторинних внутрішньо - і міжмолекулярних зв'язків і до зміни зони гідратації (від якої залежить розчинність молекул). Такі ефекти могли б викликати денатурацію або коагуляцію молекул, що підтверджується експериментально.

Третій ефект обумовлений дією сил Лоренца в змінних полях на іони в електроліті. Якщо розчин електроліту знаходиться під дією перпендикулярних один одному і синфазно змінюються електричного і магнітного полів, то електричне поле (в середньому за часом) не впливає на іони, а під дією сил

Лоренца і позитивні і негативні іони переміщуються в одному напрямку – перпендикулярно напрямку електричних силових ліній. Такого роду ефекти були експериментально виявлені. Потрібно підкреслити, що розглянуті ефекти залежать від суми рухливостей іонів, а не від їх різниці і вказують на можливість виникнення такого ефекту під дією електромагнітної хвилі, що поширюється в середовищі. При цьому дії сил Лоренца в клітинному середовищі будуть піддаватися не тільки іони електроліту, але і вільні метаболіти в іонізованій формі.

Найбільший інтерес представляють ефекти резонансного поглинання ЕМП різних частотних діапазонів в біологічних середовищах.

Теоретично було розглянуто можливість резонансного поглинання ЕМП білковими молекулами у зв'язку з так званими дисперсійними силами взаємодії. У білках, що містять ряд нейтральних і негативно заряджених основних бічних груп, середньоквадратична величина дипольного моменту відмінна від нуля, навіть якщо їх середній постійний момент дорівнює нулю. Це обумовлюється тим, що (за винятком випадку сильно кислотних розчинів) число поляризованих бічних груп в білковій молекулі зазвичай перевищує число пов'язаних з ними протонів, так що існує безліч можливих конфігурацій розподілу протонів в молекулі, мало відрізняються за вільною енергією. Для молекул ферментів, припускаючи безперервний розподіл основних груп, середня відстань між групами становить приблизно 9,5 Å. З такими диполь-дипольними взаємодіями, що відбуваються за рахунок флуктуації розподілу протонів, може бути пов'язано поглинання кванта енергії, відповідного частоті 10 ГГц. Автори припустили, що такий резонансний вплив ЕМП на розподіл протонів у молекулі ферменту може призвести до зміни швидкості утворення фермент-субстратного комплексу.

Передбачається, що поглинання енергії ЕМП надвисоких частот може бути пов'язано з обертанням внутрішньо молекулярних структур щодо зв'язків з трансляційними переходами гідроксильних груп з одного положення з водневим зв'язком в інше, з обертальними рівнями метастабільних станів і т.д. розглядалася також можливість іонізаційних ефектів ЕМП надвисоких частот, що призводять до формування радикалів  $O_2$  і він при високих імпульсних потужностях. Ці загальні припущення не отримали поки ще переконливих експериментальних підтверджень, хоча результати деяких досліджень дають підстави очікувати їх в недалекому майбутньому.

У загальному вигляді обговорювалася і можливість резонансного поглинання ЕМП у всьому тілі людини і тварин або в окремих частинах тіла. Так, наприклад, ефект втрати тваринами контролю над моторними функціями при впливі ЕМП на область голови і хребта розглядався з позицій можливого резонансу в краніальній порожнині або уздовж хребетного стовпа.

## **5. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ БІОЛОГІЧНИХ ЕФЕКТІВ ЕЛЕКТРОМАГНІТНОГО ПОЛЯ**

Ці дослідження охоплюють всю розглянуту область ЕМП-від постійних полів до міліметрових радіохвиль. Найбільш значний матеріал накопичений в дослідженнях з УВЧ – і НВЧ-діапазонами; в меншій мірі освоєні постійні магнітні та електричні поля і низькочастотний діапазон, порівняно невелике число робіт пов'язано з ЕМП високих частот.

### **Летальна дія ЕМП**

Була проведена серія експериментів для вивчення впливу на організм собак, кроликів і щурів імпульсних і безперервних СВЧ-полів високої інтенсивності (2800 і 200 МГц відповідно). В результаті експериментів з'ясували, що:

Загибель тварин настає в тих випадках, коли під дією ЕМП високої інтенсивності температура тіла тварин (визначається по ректальній температурі) підвищується до рівня вище критичного, тобто до 41...42° для великих тварин і 42...43° для дрібних. При таких умовах відбувається необоротне порушення терморегуляції в організмі і тварина гине.

Загибель тварин під дією ЕМП не можна розглядати просто як результат перегріву тіла, так як спостерігається ряд глибоких порушень регуляторних процесів в організмі, які залежать не тільки від величини електромагнітної енергії, що перетворюється в теплову, але і від частоти ЕМП, від локалізації впливу і від фізіологічного стану тварини.

Прийшли до висновку, що даний ефект можна розглядати як результат теплового стресорного дії ЕМП, тому що фази зміни температури відповідають трьом стадіям стресу – «реакції тривоги», «стадії резистентності» і «стадії виснаження», а спостережувані зміни крові характерні для ранніх проявів теплового стресу.

Особливість летального ефекту мікрохвиль проявляється в адаптації до них організму тварин при повторних опроміненнях.

### **Морфологічні зміни в тканинах і органах під дією ЕМП**

Морфологічні зміни в органах і тканинах тварин відбувається як в результаті одноразового впливу ЕМП високих інтенсивностей, так і кумулятивно – при багаторазових впливах ЕМП малих інтенсивностей.

Уражаються тим глибші тканини, чим нижче частота ЕМП і чим менше розміри тварини. Однак менш виражені зміни в глибоко розташованих органах і тканинах відзначаються і в тих випадках, коли ЕМП повністю поглинаються в поверхневих, шкірних тканинах.

Характер морфологічних змін під дією ЕМП може бути найрізноманітнішим – від різких уражень при летальних впливах (опіки, некроз тканин, крововиливи, дегенеративні зміни в клітинах і т.д.) до помірних або слабких оборотних змін при впливах ЕМП малих інтенсивностей.

Морфологічні зміни в органах і тканинах під дією ЕМП різних частот і постійного магнітного поля можуть з'являтися і за відсутності будь – якого істотного теплового ефекту. Мабуть, вони виникають за рахунок кумуляції якихось функціональних порушень регуляції обмінних процесів.

Найбільш часто спостерігаються морфологічні зміни в тканинах периферичної і центральної нервової системи, порушуються її регуляторні функції, як за рахунок розриву відповідних зв'язків, так і за рахунок зміни структури самих нервових клітин. Такі порушення однотипні при впливі ЕМП самих різних частот аж до постійного магнітного поля.

### **Дія ЕМП на очі і насінники**

Очі і насінники – органи, бідні кровоносними судинами. Отже, вони повинні сильніше нагріватися під дією ЕМП, ніж органи, в яких можливий інтенсивний відведення тепла за рахунок посилення кровотоку.

Виявлено, що при одноразовому опроміненні очей мікрохвилями (від 3 до 30 см), в результаті багаторазових опромінь (10 сеансів по 30 хвилин з інтенсивністю  $150 \text{ мВт/см}^2$ ) і при хронічному (кілька років) впливі мікрохвиль з інтенсивністю кілька  $\text{мВт/см}^2$  в кришталику ока виникає помутніння (катаракта). Також під дією мікрохвиль виявлені зниження активності ферментів аденозинфосфатази і пірофосфатази, у кроликів, що опромінювалися щодня протягом 3,5 місяця мікрохвилями інтенсивністю  $1 \text{ мВт/см}^2$ , знижувався внутрішньоочний тиск.

Чоловічі статеві органи надзвичайно чутливі до теплового впливу і, отже, особливо вразливі при опроміненні. Безпечна щільність випромінювання у вигляді максимального рівня  $5 \text{ мВт/см}^2$  значно нижче, ніж для інших чутливих до опромінення органів. В результаті опромінення сім'яників може наступити тимчасове або постійне безпліддя. Пошкодження статевих тканин розглядають особливо, так як деякі генетики вважають, що невеликі дози опромінення не призводять до будь-яких фізіологічних порушень, в той же час можуть викликати мутації генів, які залишаються прихованими протягом декількох поколінь.

Для яєчок було виявлено, що дегенеративні зміни в яєчках щурів при 10-хвилинному опроміненні мікрохвилями (2800 МГц) виникають при підвищенні температури до  $30...35^\circ\text{C}$ . При багаторазовому опроміненні 3-сантиметровими хвилями з інтенсивністю  $100 \text{ мВт/см}^2$ , що викликає підвищення температури в тканинах сім'яників тільки на  $3,3^\circ\text{C}$ , призводило до атрофії сім'яних каналців.

Морфологічні зміни в сім'яниках виникали у морських свинок під дією постійного магнітного поля (7000 Е, 500 годин) у формі некробіотичних змін

клітин сперматогенного епітелію, спостерігалось зниження в них вмісту ДНК і РНК.

### **Ефекти ЕМП при злоякісних пухлинах і променевих ураженнях**

Введення хворим тваринам екстрактів злоякісних жирових і шкірних тканин, попередньо опромінених мікрохвилями з частотою 3000 МГц, тимчасово уповільнювало розвиток пухлини і збільшувало терміни виживання. Однак ці ефекти спостерігалися не у всіх випадках, а іноді відзначалося і зворотна дія. Ін'єкції хворим тваринам опромінених (протягом 5 хв) екстрактів тканин, взятих у здорових тварин завжди приводили до уповільнення росту пухлини, якщо на період лікування з харчування виключали жири. Ін'єкції опроміненого розчину глікогену прискорювали розвиток пухлин. Спостерігалось повне розсмоктування саркоми у щурів в результаті опромінення мікрохвилями з частотою 6000 МГц при досить малій інтенсивності. Гальмування розвитку злоякісних пухлин у мишей під дією мікрохвиль (3000 і 10000 МГц) спостерігалось і при інтенсивному опроміненні, що супроводжувалося значним нагріванням тканин.

Дія постійного магнітного поля на розвиток ракової пухлини у мишей давало негативні результати – зростала кількість смертних випадків. Але комбінована дія магнітного поля і мікрохвиль виявилось вельми плідним.

Виявлено позитивний вплив мікрохвиль на опірність тварин до іонізуючого випромінювання.

Отже, в дослідях по дії ЕМП на злоякісні пухлини виявлено, що справа тут не в тепловій дії ЕМП, а в їх вплив на регуляторні функції в організмі, на регуляцію внутрішньоклітинних процесів. При променевих ураженнях виявляється вплив ЕМП на регуляцію кровотворення і на інші системи нервово-гуморальної регуляції в організмі.

### **Дія ЕМП на різні частини тіла і органи**

Відсутність кровоносних судин у деяких частинах тіла робить їх особливо вразливими до опромінення надвисокими частотами. В цьому випадку теплота може поглинатися тільки навколишніми судинними тканинами, до яких вона може надходити тільки шляхом теплопровідності. Це зокрема справедливо для тканин ока і таких внутрішніх органів, як жовчний міхур, сечовий міхур і шлунково-кишковий тракт. Мала кількість кровоносних судин в цих тканинах ускладнює процес авторегулювання температури. Крім того, відображення від граничних поверхонь порожнин тіла і областей розташування кісткового мозку при певних умовах призводить до утворення стоячих хвиль. Надмірне зростання температури в окремих ділянках дії стоячих хвиль може викликати пошкодження тканини. Відображення такого роду викликаються також металевими предметами, розташованими всередині або на поверхні тіла.

Головний і спинний мозок чутливі до змін тиску, і тому підвищення температури в результаті опромінення голови може мати серйозні наслідки. Кістки черепної коробки викликають сильні відображення, через що оцінити поглинену енергію дуже важко. Підвищення температури мозку відбувається найшвидше, коли голова опромінюється зверху або коли опромінюється грудна клітка, так як нагріта кров з грудної клітини безпосередньо направляється до мозку. Опромінення голови викликає стан сонливості з подальшим переходом до несвідомого стану. При тривалому опроміненні з'являються судоми, що переходять потім в параліч. При опроміненні голови неминуче настає смерть, якщо температура мозку підвищується на 6 °С.

В результаті сильного опромінення енергією СВЧ може статися задуха. Постраждалим необхідно зробити штучне дихання, забезпечити швидке охолодження тіла і кисневе харчування. Слід підкреслити, що у людини немає органу почуттів, який своєчасно попереджав би про небезпеку випромінювання. Через велику глибину проникнення електромагнітного випромінювання ніхто не повинен покладатися на дуже оманливі теплові відчуття шкіри.

**Дія ЕМП на нервово-гуморальну регуляцію** виявляється як по зовні проявляються реакції, так і по порушень характеру і інтенсивності фізіологічних процесів. До перших ефектів можна віднести зміни поведінки тварин: безумовні реакції на ЕМП, зміна раніше вироблених умовних рефлексів; до других – зміна функцій різних відділів нервової системи, порушення гуморальної регуляції, зміни характеру і інтенсивності біохімічних процесів.

Експериментальні дані **про вплив ЕМП на ріст тварин і рослин** не дозволяють робити будь-які висновки. Можна відзначити тільки загальні риси в дії магнітного поля: на ріст тварин воно чинить пригнічувальну дію, а на ріст рослин – стимулюючу. Що стосується впливу ЕМП на різні стадії розвитку організмів – від зародкової клітини до зростаючого організму, то в цьому відношенні можна поки відзначити тільки одну спільну рису: в більшості дослідів виявлялося порушує дію ЕМП на ці процеси.

## 6. ДОПУСТИМІ ДЛЗИ ЕЛЕКТРОМАГНІТНОГО ПОЛЯ

Численні гігієнічні дослідження показали, що у людей, які систематично піддаються впливу ЕМП радіочастот, виникають оборотні функціональні зміни нейрогуморальної регуляції. У нашій країні (в колишньому СРСР) встановлені допустимі інтенсивності ЕМП: для НВЧ – полів –  $0,01 \text{ мВт/см}^2$ , для УВЧ –  $5 \text{ В/м}$ , для ВЧ –  $20 \text{ В/м}$  для пристроїв, що працюють в області частот  $30 \dots 300 \text{ МГц}$  була введена гранична напруженість електричного поля хвилі в  $80 \text{ В/м}$ . Для частот понад  $300 \text{ МГц}$  встановлена гранично допустима потужність випромінювання  $10 \text{ мкВт/кВ/см}^2$  (для опромінюваного персоналу). Для населення цей рівень менше в  $5 \dots 10$  разів без обмеження часу опромінення.

Європейська комісія підготувала рекомендації щодо обмеження впливу широкого діапазону статичних електричних та магнітних полів на людей.

Ці поля, відомі також під назвою неіонізуючих випромінювань, створюються такими пристроями, як дисплеї, ширококомвні передавачі, стільникові і мобільні телефони, електро побутові прилади і лінії електропередач. Наприклад, електромагнітні поля частотою від  $100 \text{ кГц}$  до  $300 \text{ ГГц}$ , що використовуються в мобільних телефонах і РЕТРАНСЛЯТОРАХ GSM, можуть викликати тепловий вплив, здатне привести до підвищення температури живих організмів більш ніж на один градус Цельсія. В Україні число користувачів сотових телефонів вже перевищує  $10 \text{ млн}$ . Навряд чи кому-небудь з них приходила думка засунути голову в мікрохвильову піч – уявлення про те, що високочастотне електромагнітне випромінювання в лічені секунди може зробити з куркою, вбереже їх від такого кроку. Але, на щастя, згідно з висновками американських дослідників, побоювання, що мобільні телефони можуть викликати рак мозку, не обґрунтовані. Однак, ті ж вчені попереджають: діти, які користуються мобільними телефонами, піддаються підвищеному ризику розлади пам'яті і сну.

Рекомендації стали черговим аргументом в триваючому вже не один рік обговоренні впливу електромагнітних випромінювань на людський організм. У числі можливих наслідків опромінення фахівці називають захворювання на рак.

Рекомендації не мають статусу офіційного документа до прийняття кваліфікованою більшістю Ради міністрів країн Європи. У них міститься заклик до країн - учасниць Європейського Союзу вжити відповідних заходів для захисту населення, обмежуючи шкідливий вплив за рахунок контролю допустимої частоти.

Водночас у рекомендаціях згадується про деякі дослідження, згідно з якими небезпеку таких випромінювань для здоров'я не можна вважати доведеною.

В цілому вважається, що поки рано говорити про те, корисно чи шкідливо електромагнітне випромінювання. Як і в більшості випадків, відповідь на це питання неоднозначна. Ясно одне, питання це з кожним днем зростання цивілізації, урбанізації та науково – технічного прогресу стає все актуальніше. Людство повинно навчитися грамотно використовувати плоди свого розвитку і в той же час вміти захиститися від них.



**7. КОНТРОЛЬНІ ЗАПИТАННЯ**

1. Які змінні входять до параметрів електричного та магнітного поля?
2. Які параметри тканин тіла треба враховувати при розрахунку потужності апаратури, яка використовує високі та надвисокі частоти?
3. Як оцінити ступінь впливу ЕМП на різні тканини тіла людини?

## **8. ЗАПИТАННЯ ДЛЯ САМОСТІЙНОЇ ПІДГОТОВКИ**

1. Які фізичні основи взаємодії та впливу ЕМП на живі організми?
2. Назвіть природні та штучні джерела ЕМП та опишіть ступінь впливу їх на біоб'єкти.
3. Що показали експериментальні дослідження біологічних ефектів впливу ЕМП?
4. Як можна охарактеризувати сучасний стан вивчення проблеми впливу ЕМП на організм живий?

## Література

1. Smolyaninova Y.I., Shigimaga V.A., Kolesnikova A.O., Popivnenko L.I., Todrin A.F. Electric Conductivity and Resistance of Mouse Oocyte Membranes to Effect of Pulsed Electric Field in Cryoprotectant Solutions // *Probl. Cryobiol. Cryomed.* – 2018. – V. 28. – No 4. – P. 311 – 321.
2. Шигимага В.А. Метод и аппаратура импульсной кондуктометрии одиночных клеток животных и жидких сред // *Акт. вопр. биофизики и химии: мат. VII междунар. науч.-техн. конф., г. Севастополь, 26 – 30 апр. 2011 г.* – Севастополь, 2011. – С. 25 – 26.
3. Шигимага В. О. Біотехнічний комплекс імпульсної кондуктометрії і електроманімуляції з клітинами тварин. Автореф. дис. д.т.н. 05.11.17. – Харків: ХНТУСГ. – 2014. – 36 с.
4. Shigimaga V.A. Conductometry in Pulsed Electric Field with Rising Strength: Bioelectrochemical Applications // *Analytical and Bioanalytical Electrochemistry.* – 2019. – V. 11. – N. 5. – P. 598 – 609.
5. Shigimaga V.A. Measurements of the capacitance of a biological cell by a pulse method // *Measurement Techniques.*-N.Y.: Springer New York, LCC, 2014. – V. 57. – N 2. – P.213 – 217.
6. Шигимага В. А., Мегель Ю. Е. Применение метода импульсной кондуктометрии для исследования электрических характеристик биологических клеток // *Праці Інституту електродинаміки НАН України.* – Київ. – 2012. – Вип. 31. – С. 147 – 155.
7. Биккенин Р. Р., Чесноков М. Н. Теория электрической связи: учебное пособие для студ. высших учебных заведений. М.: Академия, 2010. – 329 с.
8. Назаров А. В., Шитов И. В., Козырев Г. И и др. Современная телеметрия в теории и на практике. Учебный курс. СПб.: Наука и техника, 2007. 627 с.
9. О возможности диагностики заболеваний у животных путем измерения собственного электромагнитного излучения тканей (радиотермометрия) / Косулина Н.Г., Чакина Н.А. // *Проблеми біоніки.* – Збірник наукових праць. Випуск 51. – Харків: ХДТУР. –1999. – С. 80 – 83.
10. Радиотермометрія в діагностиці стану сільськогосподарських тварин / Черенков А. Д., Балан Г. П., Косуліна Н. Г. // *Питання електрифікації сільського господарства. Збірник наукових праць.* – Харків: ХДТУСГ. – 1999. – С. 80 – 82.
11. Аналіз методів дослідження взаємодії електромагнітного поля (ЕМП) з біологічними об'єктами / Косуліна Н. Г // *Вісник Харківського державного технічного університету сільського господарства. “Проблеми енергозабезпечення та енергозбереження в АПК України”.* – Харків: ХДТУСГ, 2003. – Вип. 19, Т. 1. – С. 202 – 212.
12. Використання мікрохвильових технологій у сільському господарстві / Косуліна Н. Г // *Праці. Таврійська державна агротехнічна академія.* – Мелітополь: ТДАТА, 2003. – Вип. 15. – С. 141 – 148.

13. Применение информационных электромагнитных полей в технологических процессах сельского хозяйства / Черенков А. Д., Косулина Н. Г. // *Світлотехніка та електроенергетика. Міжнародний науково-технічний журнал. Харківська національна академія міського господарства.* – 2005. – №5. – С. 77 – 80.
14. Низкоэнергетические электромагнитные технологии в растениеводстве / Косуліна Н. Г., Черенков А. Д. // *Світлотехніка та електроенергетика. Міжнародний науково-технічний журнал. Харківська національна академія міського господарства.* – 2008. – № 4(16). – С. 80 –85.
15. Биофизический анализ воздействия информационного электромагнитного поля на биологические объекты / Косуліна Н. Г // *Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства ім. Петра Василенка. Проблеми енергозабезпечення та енергозбереження в АПК України.* – 2013. – Вип. 141. – С. 86 – 87.
16. Kosulina, N.G., Chorna, M.O., Boroday, I.I., Avrunin, O.G., Semenets, V.V. Analysis of characteristics of semi-disc leucosapphire resonator with electronic frequency tuning // *Telecommunications and Radio Engineering (English translation of Elektrosvyaz and Radiotekhnika)*, 2022, 81(6), pp. 1–14.  
<https://doi.org/10.1615/TelecomRadEng.2022037910>  
<https://www.dl.begellhouse.com/journals/0632a9d54950b268,1def5b8f2ff2c9b2,11d0f0235eebe79d.html>
17. Kosulina, N., Sorokin, M., Handola, Y., Kosulin, S., & Korshunov, K. Forming an elliptical directional diagram of the sectoral horn antenna for flow irradiation of sugar beet seeds by electromagnetic field // *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2023, 1(5 (121), 26–37.  
<https://doi.org/10.15587/1729-4061.2023.273972>  
<https://pdfs.semanticscholar.org/8b3b/9c5e2550448e1fb478f851492eac1d0c0274.pdf>
18. Kosulina, N., Kosulin, S., Korshunov, K., Lysychenko, M., Sorokin, M., Handola, Y. & Vitalii, H. 2023, "Substantiation of Requirements to the Gas Discharge Visualization-Based Technical System for Studying Bio-objects", *SSRG International Journal of Electrical and Electronics Engineering*, vol. 10, no. 2, pp. 132–142.  
<https://doi.org/10.14445/23488379/IJEEE-V10I2P113>  
<https://www.internationaljournalsrg.org/IJEEE/paper-details?Id=451>

**ВЗАЄМОДІЯ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ ПОЛІВ  
З БІОЛОГІЧНИМИ ОБ'ЄКТАМИ**

**Методичні вказівки  
до виконання практичної роботи**

**УКЛАДАЧІ:** В. О. Шигимага, Н. Г. Косуліна, М. О. Чорна, Г. А. Ляшенко, В.  
В. Сухін, К. С. Коршунов

Формат 60x84/16. Гарнітура Times New Roman  
Папір для цифрового друку. Друк ризографічний.

Ум. друк. арк. 1,2

Наклад 100 пр.

Державний біотехнологічний університет  
61002, м. Харків, вул. Алчевських, 44