УДК 615.849.11

Плакса Д.В.
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Терещенко М.Ф.
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

ОЦІНКА ВПЛИВУ НАДВИСОКОЧАСТОТНОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ НА БІОЛОГІЧНІ ТКАНИНИ

Проведено дослідження впливу електромагнітного надвисокочастотного (НЗВЧ) випромінювання міліметрового діапазону на біологічні тканини та оцінено його тепловий вплив. Виконано вимірювання інтенсивності НЗВЧ-випромінювання апарату «Поріг-3» у всіх режимах роботи. Встановлено відмінності впливу випромінювання залежно від виду біологічної тканини та параметрів навколишнього середовища. Визначено залежність зміни температури біологічного об'єкта від часу експозиції. Розроблена методика підбору оптимальних параметрів НЗВЧ-терапії. Отримано формули визначення дози та інтенсивності випромінювання з урахуванням температурних градієнтів середовища. Проведені порівняльні розрахунки. Встановлено та проаналізовано похибки значень дози та інтенсивності випромінювання. Обґрунтовано можливість зменшення доз опромінення без втрати лікувального ефекту.

Ключові слова: *НЗВЧ-терапія, параметри випромінювання, тепловий вплив.*

Постановка проблеми. Одним з основних завдань сучасної медицини є пошук засобу лікування, який має мінімальну кількість протипоказань і побічних ефектів та доволі широку область клінічного використання. Нині такі вимоги можуть забезпечуватись фізіотерапевтичними апаратами різного призначення, при чому як у режимі монотерапії, так і у комбінації з іншими апаратними і/чи фармакологічними засобами [1].

Широкого поширення набули радіофізичні методи впливу на біологічні об'єкти і системи з метою фізіологічної, імунної та психомоторної корекції процесів функціонування живих структур. Перспективним напрямом досліджень є розробка та вдосконалення апаратів, що базуються на низькоінтенсивній стимуляції електромагнітним випромінюванням міліметрового діапазону біологічної тканини [2].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. За порівняно короткий термін існування методу міліметрової резонансної терапії (МРТ) у світі проведено багато досліджень у цій галузі та опубліковано наукових праць. У цих роботах порушувались питання ефективності лікування цим методом, пошук областей клінічного застосування, можливості поєднання МРТ з іншими видами фізіотерапії, такими як лазеротерапія, фоно- або ендоіонофорез [3; 4].

Також широкого поширення набули дослідження в області створення апаратів із біологічним зворотнім зв'язком. У таких апаратах лікар отримує інформацію про реакцію організму пацієнта на вплив міліметрового (ММ) випромінювання безпосередньо під час сеансу лікувальної процедури. У числі перших така ідеологія була застосована в апараті «Електроніка-КВЧ-ОС» [5].

Класичним напрямом є пошук нових терапевтичних резонансних частот, відмінних від трьох основних: 53,5 ГГц (довжина хвилі λ=5,6 мм), 42,2 ГГц (λ=7,1 мм), 61,2 ГГц (λ=4,9 мм) [6].

Досліджується питання оптимального підбору параметрів МРТ: терапевтичної частоти, зони впливу, час процедури, їх кількість, оптимальної терапевтичної дози, частоти модуляції [7].

Вчені-біофізики, фізіологи, лікарі продовжують науковий пошук, досліджуючи механізми біологічних ефектів і наближаються до дедалі більш повного розуміння ролі низькоінтенсивних ММ-випромінювань у процесах життєдіяльності біологічних систем різного рівня організму. Технічний прогрес сприяє мініатюризації апаратури і різноманітності сервісних функцій, що включають вибір частоти і виду модуляції, програмування сеансу користувачем і від ЕОМ, пристрої спряження з діагностичними комп'ютерними комплексами, індикатори працездатності і режимів, таймер, енергозберігаючі режими тощо [8].

Розробляються компактні переносні апарати з автономними джерелами живлення, зі спеціальними конічними насадками, що дають змогу кон-

центрувати випромінювання в області до кількох долей міліметрів, зі змінними насадками і спеціальними опромінюючими головками для використання апарату під час терапії широкого набору нозологій [9].

Постановка завдання. У зв'язку з індивідуальним характером чутливості людини до такого фізіотерапевтичного впливу для того щоб отримати максимальний лікувальний ефект та контролювати безпеку пацієнта, необхідно обрати оптимальні параметри впливу та проводити їх контроль, за необхідності – коригувати протягом тривалості процедури.

Міліметрові хвилі характеризуються невисокою проникністю (0,1−0,2 мм) у біологічні тканини та високим поглинанням у воді та середовищах, що її містять. Таке випромінювання має низку властивостей, які дають змогу його безпечно та ефективно використовувати з терапевтичною метою [10].

Встановлено, що НЗВЧ-випромінювання має пороговий характер стосовно зміни його потужності та часу випромінювання. У такому разі біологічний вплив випромінювання не змінюється при збільшенні густини потужності щодо встановленого порогового значення. При цьому враховується час випромінювання, адже час відклику для кожної частини біологічної тканини організму є різним [11].

Вагому дію на результат терапії мають параметри випромінювання: експозиція, довжина хвилі, локалізація, густина потоку потужності, довго тривалість курсу та початковий стан організму. Для досягнення найкращого ефекту при застосуванні цих методів терапії враховують взаємодію клітин із зовнішнім електромагнітним полем на частотах, однакових або кратних їх власним, для встановлення резонансного впливу на «хворі» клітини організму людини. Лікувальними та найбільш часто використовуваними частотами НЗВЧ-терапії вважають: 42,2 ГГц (довжина хвилі λ=7,1 мм), 53,5 ГГц (λ=5,6 мм) та 61,2 ГГц (λ=4,9 мм) та низку інших [12].

Тому задачею цієї роботи є експериментальне дослідження та оцінка впливу електромагнітних хвиль міліметрового діапазону на біологічні тканини, розробка математичної моделі підбору оптимальних параметрів терапії з метою максимізації лікувального ефекту та безпеки пацієнта.

Виклад основного матеріалу дослідження. Перед фізіотерапевтичною процедурою для апаратів МРТ встановлюють терапевтичну частоту, зону впливу, час процедури, кількість сеансів, оптимальну терапевтичну дозу та частоту модуляції. Терапевтична частота обирається з низки рекомендованих для найбільш поширених захворювань чи патологій, але при цьому варіюється та уточнюється час впливу індивідуально, в процесі виконання самої процедури. Згідно з даними клінічних досліджень найбільший лікувальний ефект досягається в діапазоні частот 52−78 ГГц [13].

Зона впливу визначається після постановки діагнозу за допомогою пошукових електричних апаратів. Час процедури має тривати від 10−15 до 40−50 хвилин, але враховують, щоб одна зона опромінювалась не більше 10−15 хвилин. Кількість процедур у середньому становить від 7 до 14. Значення оптимальної терапевтичної дози визначається за формулою [13]:

$$Д=kP_{t\alpha}/(\gamma\eta S), \quad (1)$$

де $Д$ – оптимальна терапевтична доза, k – коефіцієнт поглинання середовища, в якому поширюється випромінювання, P – потужність падаючого випромінювання, t − час опромінення, α – коефіцієнт модуляції, γ – індивідуальна біологічна чутливість об'єкта , η – степінь ураження хворої ділянки, S – площа зони впливу. Частота модуляції визначається згідно з частотами ритмічних процесів, що відбуваються в організмі людини [13].

Але ця формула неповною мірою характеризує процес дії НЗВЧ-випромінювання на біологічну тканину. Не враховані зміни температурних градієнтів навколишнього середовища ΔTc. Таким чином, більш достовірна формула має вид:

$$Д_1=kP_{t\alpha}\Delta T_c/(\gamma\eta S), \quad (2)$$

де ΔT_c – коефіцієнт, що враховує зміни температурного градієнту навколишнього середовища $\Delta T_c=T_1 - T_0$,; T_0, T_1 − температура на початку та по завершенню одного виміру в експерименті.

Проведені нами експериментальні дослідження показали, що результати опромінення відрізняються залежно від виду біологічної тканини та параметрів навколишнього середовища. Це означає, що коригування дози випромінювання, з огляду на зміни температурного градієнту навколишнього середовища ΔT_c, виправдано для оцінки запланованих доз і забезпечення достовірності лікувального ефекту. Проведене математичне моделювання визначення дози опромінення за формулами (1) та (2). Для визначення розбіжності результатів розрахунків за класичною формулою (1) та отриманою нами (2), що містить коефіцієнт врахування впливу градієнту температури навколишнього середовища, розраховано абсолютну Δ та порівняну δ похибки.

Параметри, що входять до обох формул, задані за методикою лікування НЗВЧ-випромінюванням трофічної виразки [14]. Як температурний градієнт середовища обраховано та встановлено ΔT_c =1,2°С – середня величина коливання температури у приміщенні для більшої наочності порівняння. Згідно з проведеними розрахунками при зміні температури середовища на 1,2°С доза опромінення, визначена за формулою (2) щодо дози за (1), має абсолютну похибку Δ=12,9 Дж/мм^2 та порівняну δ=17%, що означає змогу значно зменшити дозу опромінення без втрати лікувального ефекту.

У медичній практиці частіше використовують не значення оптимальної терапевтичної дози, а значення інтенсивності НЗВЧ-випромінювання, яку визначають за формулою Релея-Джинса [14]:

$$J_\omega = \frac{8\pi f^2}{c^2}\beta kT = \frac{8\pi}{\lambda^2}\beta kT, \qquad (3)$$

де f − частота коливань, k − постійна Больцмана, T − термодинамічна температура тіла, c − швидкість світла, β − коефіцієнт випромінюючої здатності тіла, λ − довжина хвилі .

Оскільки на покази приладу для вимірювання температури біологічного зразка значним чином впливає температура навколишнього середовища, ці варіації необхідно врахувати при виконанні фізіотерапевтичних процедур чи моделюванні процесу змін інтенсивності НЗВЧ-випромінювання. Таким чином, з урахуванням температур $T_{середовища}$ навколишнього середовища формула визначення інтенсивності набуває вигляду:

$$J_{1\omega} = \frac{8\pi f^2}{c^2}\beta kT K_{\text{Тсередовища}} \qquad (4)$$

де $K_{Tсередовища} = T_{середовища\ /T}$ − коефіцієнт, що враховує зміну температур $T_{середовища}$ навколишнього середовища.

За отриманими виразами (2, 4) проведено математичне моделювання та практичні виміри впливу НЗВЧ-випромінювання на різні типи біологічної тканини залежно від частот та градієнтів температур.

При порівнянні отриманих результатів з урахуванням температурного градієнту можна стверджувати, що досягнуто більш достовірну оцінку лікувального ефекту через більш точне та достовірне значення оптимальних терапевтичних доз та інтенсивності НЗВЧ-випромінювання, з урахуванням параметрів навколишнього середовища та дійсних значень впливу. Це забезпечує точне виконання Регламенту та Протоколу проведення фізіотерапевтичної процедури НЗВЧ-опромінення у допустимих межах безпеки пацієнта.

Необхідність оцінки теплового впливу МРТ на біологічну тканину спонукає те, що цей вид лікування належить до напряму електротерапії, а значить, треба забезпечити безпеку проведення процедури (попередити можливість перегріву тканин) і зафіксувати зміни для оцінки ефективності терапії. Проведено низку експериментів з оцінки впливу НЗВЧ-випромінювання з урахуванням вікових змін шкіряного покрову та статевого розподілу зі змінами температури тканини залежно від тривалості процедури. Дослідження проводились в 5 цільових групах, розділених по віку, статі та характеру біологічної тканини:

– жінки віком до 30 років;
– жінки віком від 30 років;
– чоловіки віком до 25 років;
– чоловіки віком від 25 років;
– нежива тваринна тканина.

Зоною впливу для дослідження людей було обрано долоню руки, а для тваринних біологічних тканин – шкіру, жирову та м'язову тканини окремо. Блок-схему установки для дослідження показано на рис. 1.

Рис. 1. Блок-схема установки для дослідження НЗВЧ-випромінювання

Для реалізації методу НЗВЧ-терапії використовуються різні типи апаратів: прилади, що утворюють гармонічні сигнали незмінної частоти («Явь-1», «Электроника-НЗВЧ», «РАМЕД-ЭКСПЕРТ»), широкосмугові апарати, що утворюють шумові сигнали («Поріг-1», «Поріг-3», «Поріг-3М», «Арцах», «Шлем»), апарати, що утворюють і шумові, і гармонічні сигнали («АМРТ-01», «Арцах»), апарати, що можуть формувати квазішумові сигнали («АМТ-Коверт-04», «ARIA-SC») [15].

У цих дослідженнях терапії НЗВЧ-опромінення використовувався апарат «Поріг-3», який має робочий діапазон частот 54−78 ГГц і потужність випромінювання 0,1−1 нВт. Це портативний апарат для НЗВЧ-терапії, який складається з генератора НЗВЧ-випромінювання і блоку живлення. Як пристрій для вимірювання температури випромінювання було вибрано матричний Mobir 3M та

диференціальний FLIR E75 тепловізори. Ці прилади мають температурну чутливість порядку 0,1 та 0,01°С відповідно. На рис. 2 наведено фото установки для досліджень НЗВЧ-випромінювання.

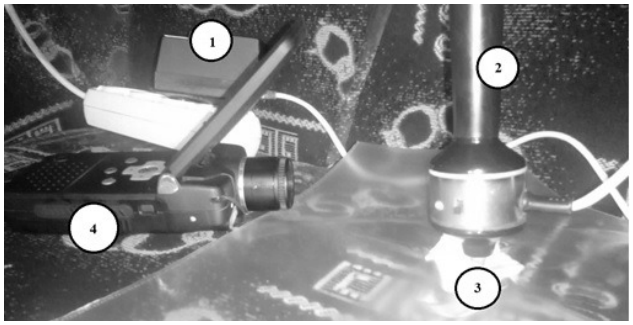

Рис. 2. Установка дослідження НЗВЧ-випромінювання: 1 – блок живлення, 2 – генератор НЗВЧ-випромінювання, 3 – біологічна тканина, 4 – інфрачервона (ІЧ)-камера Mobir 3M

При проведенні досліджень були виміряні інтенсивності випромінювання на різних частотах. Досліди проводились у НТУУ «КПІ ім. Ігоря Сікорського», в лабораторії мікрохвильової радіометрії. Як вимірююча система використана їх метрологічно атестована установка [15].

Результати експериментів використані в подальших математичних розрахунках та порівняні з теоретичними значеннями при моделюванні.

Отримані результати експерименту наведено у вигляді графіків залежно від зміни температури від тривалості терапії, обрано графіки, що усереднюють результати дослідження по кожній із цільових груп (рис. 3).

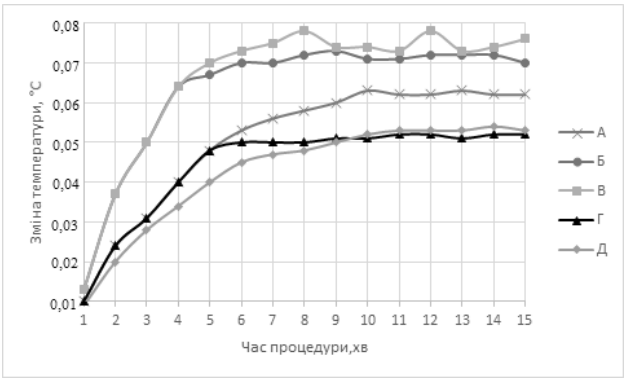

Рис. 3. Середні значення результатів досліджень по кожній із цільових груп: А – чоловіки до 25 років, Б – чоловіки від 25 років, В – жінки до 30 років, Г – жінки від 30 років, Д – біологічна тканина тварини

Як видно з наведених графіків, спочатку відбувається зростання температури досліджуваної тканини зі збільшенням часу терапії, а починаючи з деякого моменту часу (5–7 хвилин) температура практично не змінюється. Для різних цільових груп форма графіків є подібною, але різняться максимальні амплітуди зміни температури та час, починаючи з якого вона переходить у стан стабілізації.

При відповідному регулюванні вихідної потужності генератора надвисоких частот і тривалості опромінення різні тканини, що містять кровоносні судини, можуть бути нагріті до різних температур. Температура тканин починає підвищуватися відразу ж після підведення до неї енергії НЗВЧ-випромінювання. Суттєве зростання температури триває 5–8 хвилин, далі до 15–20 хвилин триває коливання температури в межах 0,01°С підвищення температури тканини порівняно з середньою температурою тіла, після чого температура починає спадати. Падіння температури в опроміненій ділянці відбувається в результаті різкого збільшення в ній протоку крові, що призводить до відповідного відведення теплоти.

Відсутність кровоносних судин у деяких частинах тіла робить їх особливо вразливими до опромінення надвисокими частотами. У цьому випадку теплота може поглинатися тільки оточуючими 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 у цих тканинах ускладнює процес саморегулювання 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 ушкодження біологічної тканини. Відображення такого роду викликаються також металевими предметами, розташованими всередині або на поверхні тіла в зоні дії НЗВЧ-випромінювання.

При інтенсивному опроміненні цих тканин НЗВЧ-хвилями спостерігається їх перегрів, що може призвести до незворотних змін. У той же час НЗВЧ-хвилі малої потужності благотворно впливають на організм людини, що використовується в медичній практиці як мікрохвильова резонансна та інформаційна терапія.

Вирішальне значення при впливі електромагнітних хвиль надвисокочастотного діапазону мають характер і інтенсивність опромінення, його тривалість, площа опромінюваної поверхні тіла, довжина хвилі, індивідуальні особливості живої системи, зокрема конституційні параметри, тип нервової системи, вік, спадковість, шкідливі звички, стан імунітету, біологічний ритм,

наявність у діапазоні резонансних частот для різних частин та систем тіла (шия, голова, нижні і верхні кінцівки, кровоносна, лімфо- та нервова системи).

З огляду на багатошарову будову тканин і систем умовно вважають, що при мікрохвильовій терапії глибина проникнення електромагнітних хвиль становить 0,1−0,2 мм від зони дії НЗВЧ-випромінювання на поверхні тіла [16].

Для неживої біологічної тканини тварин та жінок віком від 30 років характерний найменший поверхневий нагрів біотканин та доволі швидкий перехід зміни температури у стан стабілізації. Це може бути викликано ступенем кровонасичення тканини чи його відсутністю, ослабленою регенераційною здатністю та поглинальною здатністю шкіри, втратою вологості, процесами старіння шкіри для людей та дійсним станом неживого – злипанням ліпідних шарів мембран клітин для тварин.

Максимальний нагрів тканин спостерігається у груп В та Б – жінки до 30 років та чоловіки від 25 років, але вони мають різний час до переходу температури у практично незмінний стан. Це може пояснюватись двома факторами: більш молода біотканина має більшу сприйнятливість до нагріву (для жінок до 30) та зміни умов середовища проведення експерименту – з зимньої пори року на весняну (для чоловіків від 25), що означає вагомий вплив температурних градієнтів як біотканини, так і навколишнього середовища на результати вимірювання.

Як видно з графіків, для груп до 25−30 років більший нагрів тканин та швидший перехід температури у стан стабілізації спостерігається для жінок, а для груп від 25−30 років – для чоловіків. Це може пояснюватись швидшим процесом регенерації для жіночої шкіри. Тваринна тканина займає найменші показники за усіма критеріями. Це може бути викликано і тим, що це нежива біотканина, зліплені ліпідні шари мембран клітин і те, що вимірювання для неї проводились взимку, при нижчих температурах.

За отриманими результатами можна зробити висновок про доволі високу безпеку процедури, адже нагрів тканини перебуває в межах 0,1°С, а найінтенсивніший нагрів відбувається в перші 5−8 хвилин терапії, далі НЗВЧ-терапія в основному характеризується нетепловою дією, температура практично не змінюється.

Подібні результати отримали й інші дослідники [17; 18].

Результати експериментів по визначенню значення інтенсивності наведено у таблиці 1.

Таблиця 1

Результати вимірювання інтенсивності.

Частота, ГГц	Інтенсивність, дБ
53	29
52	37
51	27
50	37
49	26
47	30
45	26
40	32
37	22

Проведемо математичне моделювання змін інтенсивності залежно від частоти та температури, визначимо характер процесів впливу НЗВЧ-терапії. Розрахуємо параметри НЗВЧ-випромінювання за формулами (3) і (4) та порівняємо їх зі значеннями інтенсивностей, отриманими експериментально. Отримані результати приведені у вигляді графіків.

Для визначення розбіжності результатів розрахунків за класичною формулою (3) та отриманою (4), що містить коефіцієнт врахування впливу температур навколишнього середовища та біотканини, розраховано абсолютну Δ та порівняну δ похибки.

Згідно з проведеними розрахунками, інтенсивність, визначена за формулою (4) щодо інтенсивності за (3) має абсолютну похибку Δ=5,65 дБ та порівняну δ=18%, що означає змогу значно зменшити інтенсивність опромінення без втрати лікувального ефекту.

Як значення частоти використані виміряні попередньо дійсні параметри впливу НЗВЧ-терапії. Як значення температури обрано початкові виміряні температури за цільовими групами.

Як видно з наведених графіків, інтенсивність змінюється практично лінійно, зростаючи від збільшення як температури, так і частоти. Обраховані значення інтенсивностей знаходяться в середині виміряного діапазону (табл. 1).

Оскільки більші значення температур біологічної тканини були виміряні при більш теплій порі року, тобто умовах більших температур навколишнього середовища, при цьому згідно з графіками зросла і інтенсивність, розрахована як за класичною формулою (3), так і введеною у процесі досліджень (4), це означає доцільність поправки на вплив навколишнього середовища. Практично лінійний характер зміни інтенсивності дає змогу ефективно контролювати цей параметр шляхом вибору середовища (приміщення) прове-

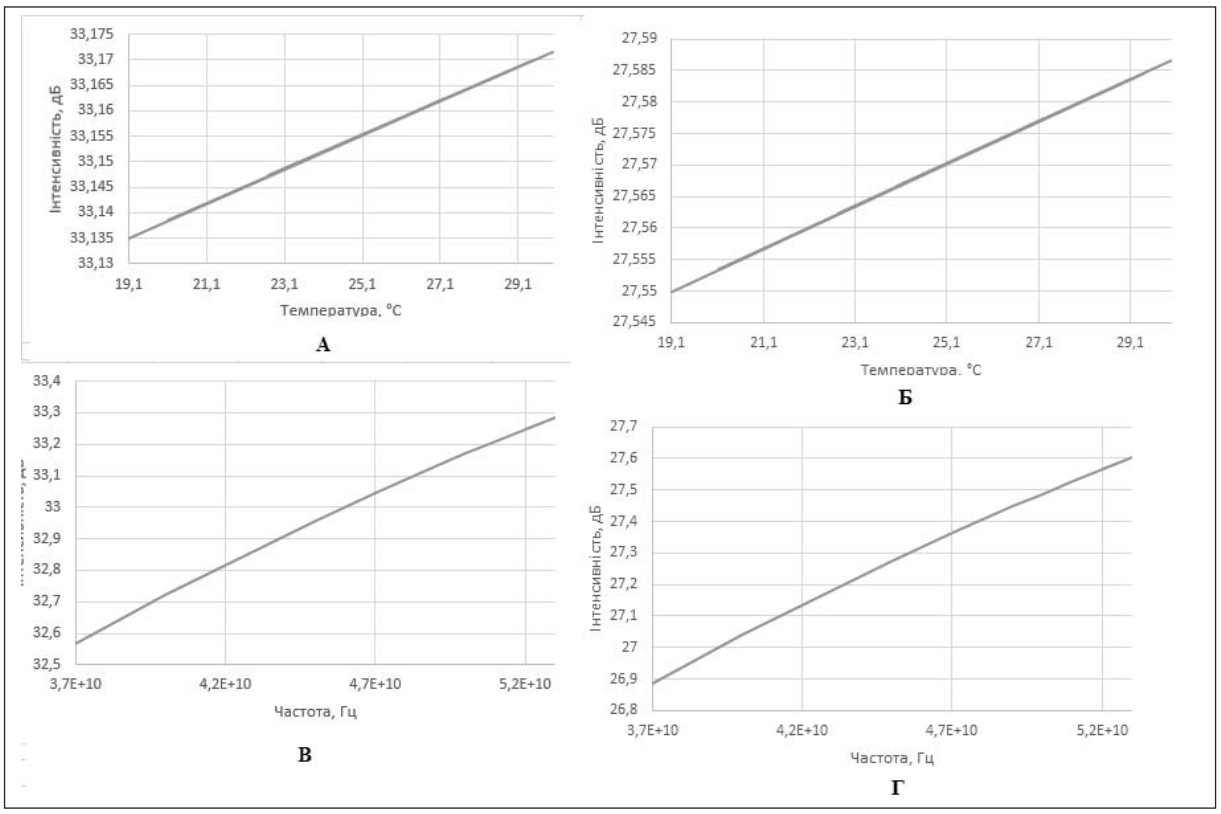

Рис. 4. Графіки зміни обчислених значень інтенсивності залежно від: А − температури (без врахування температури середовища); Б − температури (з врахуванням температури середовища); В − частоти (без врахування температури середовища); Г − частоти (з урахуванням температури середовища)

дення терапії з відповідним оптимальним температурним режимом.

Висновки. У цій статті проведено дослідження та оцінку впливу − випромінювання на біологічні тканини, особливості, аспектів та принципів побудови апаратів НЗВЧ-терапії. Результати експериментів з оцінки теплового впливу НЗВЧ-випромінювання на різні типи біологічних тканин та вимірюванню інтенсивності такого випромінювання показали, що відбувається незначне зростання температури досліджуваної тканини зі збільшенням часу терапії, а починаючи з деякого моменту часу (5−8 хвилин) температура практично не змінюється. Для різних цільових груп форма графіків є подібною, але різняться максимальні амплітуди зміни температури та час, починаючи з якого вона переходить у стан стабілізації.

Виконано математичне моделювання впливу сигналів НЗВЧ-випромінювання на різні типи біологічної тканини залежно від частот та градієнтів температур. Проведено порівняння розрахунків з та без урахування температурних градієнтів. Середнє значення абсолютної та порівняної похибки для дози опромінення становило Δ=12,9 Дж/мм^2 та δ=17%, для інтенсивності Δ=5,65 дБ та δ=18%.

Таким чином, врахування коефіцієнтів впливу температур навколишнього середовища $K_{Tсередовища}$ дасть змогу зменшити параметри опромінення на 17−18% без зниження лікувального ефекту терапії.

Лінійний характер зміни інтенсивності дає змогу ефективно контролювати цей параметр шляхом вибору середовища (приміщення) проведення терапії з відповідним оптимальним температурним режимом.

Отримані дані використані для вдосконалення реальної математичної моделі, яка в подальшому може бути використана для максимізації лікувального ефекту шляхом підбору найбільш оптимальних безпечних параметрів терапії.

Список літератури:

1. Терещенко М.Ф., Тимчик Г.С., Чухраєв М.В., Кравченко А.Ю. Ультразвукові фізіотерапевтичні апарати та пристрої: монографія. Київ: НТУУ «КПІ ім. Ігоря Сікорського», 2018. 184 с.
2. Chukhraiev N.V., Vladimirov A.A., L.Vilcahuaman, W. Zukow, Samosyuk N.I., Chukhraieva E., Butskaya L.V. Application of ultrasonic waves, magnetic fields and optical flow in rehabilitation. Kyiv, 2017. 324 p.

3. Домашевская Н.В. КВЧ и КВЧ - лазеротерапия в комплексном амбулаторном лечении гипертонической болезни: автореф. дис. …канд. мед. наук: 14.00.06. Самара, 2000. 21с.
4. Лобзовская Н.П. Комплексное лечение больных витилиго и использованием фоно-, эндоионофореза меди и КВЧ-волн: дис. …канд. мед. наук : 14.00.51. 2003. 234 с.
5. Корнаухов А.В., Максимов Г.А., Анисимов С.И., Гуревич М.Л. Аппараты КВЧ-терапии с шумовым спектром в диапазоне частот 25-110 ГГц и биологической обратной связью. Вестник Нижегородского государственного университета им. Н.И. Лобачевского. Серия «Биология». 2001. Вып. 2. Ч. 4. С. 22−26.
6. Ситько С.П., Мкртчян Л.Н. Введение в квантовую медицину. Київ, 1994. 146 с.
7. Москаленко В.Ф., Сітько С.П., Горбань Є.М., Грубник Б.П., Яненко О.П. Квантова медицина: від фундаментальних основ до практичного використання. Український медичний часопис. 2002. № 28. С. 106−109.
8. Бецкий О.В., Беляков С.В., Яременко Ю.Т. Состояние и тенденции развития аппаратуры для КВЧ-терапии. Биомедицинская радиоэлектроника. 1998. № 3. С. 50−56.
9. Бецкий О.В. Миллиметровые волны в биологии и медицине. Радиотехника и электроника. 1993. Т. 38. № 10. С. 1760−1782.
10. Терещенко М.Ф., Матвієнко С.М. Математическая модель взаимодействия источников излучения КВЧ-диапазона с биологическими средами. Актуальні питання біологічної фізики та хімії: матеріали VII міжнар. наук.-техн. конф. (Севастополь, 26−30 квітня 2011 р.). Севастополь: СевНТУ, 2011. С. 130−132.
11. Яненко О.П., Перегудов С.М. Вимірювання низькоінтенсивних сигналів біологічних об'єктів у мм-діапазоні. Радіотехнічні поля, сигнали, апарати та системи (теорія, практика, історія, освіта): матеріали конф. (Київ, 22−29 лютого 2012 р.). Київ, 2012. С. 112−113.
12. Бецкий О.В., Кислов В.В., Лебедева Н.Н. Миллиметровые волны и живые системы. Москва, 2004. 272 с.
13. Матяш М.Н., Чухраєв Н.В., Шимков Г.Е. КВЧ-акупунктура. Киев, 2001. 152 с.
14. Яненко О.П., Ваганов О.А. Методи та засоби контролю фізичних параметрів текстильних матеріалів. Вісник НТУУ «КПІ». Серія «Приладобудування». 2009. Вип. 38. С. 107−111.
15. Яненко О.П., Куценко В.П., Перегудов С.М. Електронна аппаратура лікувально-діагностичних технологій: навч. посібник. Донецьк: ІПШІ «Наука і освіта», 2011. 212 с.
16. Ситько С.П., Скрипник Ю.А., Яненко А.Ф. Аппаратурное обеспечение современных технологий квантовой медицины. Киев, 1999. 199 с.
17. Плакса Д.В., Терещенко Н.Ф. Оценка теплового воздействия микроволновой резонансной терапии на биологическую ткань. Новые направления развития приборостроения: материалы 11 междунар. науч.-техн. конф. (Минск, 18−20 апреля 2018 г.). Минск: БНТУ, 2018. С. 78.
18. Бецкий О.В., Лебедева Н.Н. Биологические эффекты миллиметровых волн низкой интенсивности. Microwave&Telecommunication Technology: материалы конф. (Севастополь, 9−13 сентября 2002 г.). Севастополь, 2002. С. 67−71.

ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ КРАЙНЕ ВЫСОКОЧАСТОТНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ НА БИОЛОГИЧЕСКИЕ ТКАНИ

Проведено исследование влияния электромагнитного излучения крайне высокой частоты (КВЧ) на биологические ткани и оценено его тепловое воздействие. Выполнено измерение интенсивности КВЧ-излучения аппарата «Порог-3» во всех режимах работы. Установлены различия влияния излучения в зависимости от вида биологической ткани и параметров окружающей среды. Определена зависимость изменения температуры биологического объекта от времени экспозиции. Разработана методика подбора оптимальных параметров КВЧ-терапии. Получены формулы определения дозы и интенсивности излучения с учетом температурных градиентов окружающей среды. Проведены сравнительные расчеты. Установлены и проанализированы погрешности значений дозы и интенсивности излучения. Обоснована возможность уменьшения доз облучения без потери лечебного эффекта.

Ключевые слова: *КВЧ-терапия, параметры излучения, тепловое воздействие.*

ASSESSMENT OF THE EFFECT OF HIGH-FREQUENCY RADIATION ON BIOLOGICAL TISSUES

The exploration of the influence of high frequency electromagnetic radiation on biological tissues was carried out and its thermal influence was estimated. The measurement of the intensity of the high frequency radiation of the "Porog-3" apparatus is performed in all modes of operation. Differences in radiation exposure depending on the type of biological tissue and environmental parameters are established. The dependence of the temperature change of the biological object on the time of exposure is determined. The method of selection of optimal parameters of microwave therapy is developed. Formulas for determining the dose and intensity of radiation are taken into account the temperature gradients of the environment. Conducted comparative calculations. Errors of dose and radiation intensity were established and analyzed. The possibility of decreasing irradiation doses without losing of therapeutic effect is substantiated.

Key words: *high-frequency therapy, parameters of influense, thermal influence.*