

УДК 615.8

Лапченко Ю.С., к.т.н., Дубина П.В.

Луцький національний технічний університет

ОСОБЛИВОСТІ НИЗЬКОЧАСТОТНОГО МАГНІТНОГО ПОЛЯ ДЛЯ МАГНІТОТЕРАПІЇ

В даній статті описано характеристики магнітного поля призначеного для терапії низькочастотним магнітним полем, такі як магнітна індукція, інтенсивність магнітного поля, градієнт магнітної індукції, магнітний потік. Показано, що будь який біологічний об'єкт є абсолютно прозорим для магнітного поля. Наведені різновидності магнітного поля: однорідне та неоднорідне магнітне поле, постійне магнітне поле. Описані різновидності змінного магнітного поля: синусоїдального, імпульсного, пульсуючого. Показані різновидності безперервного та перервного магнітного поля. Описано дію електрорушійної сили індукції на біологічний об'єкт. Описані тепло та вібрація, як супутні явища, що супроводжують дію магнітного поля. Обґрунтовані такі медичні процедури як магнітофорез та магнітопунктура. Наведено можливість об'єднаного впливу магнітного поля та інфрачервоного випромінювання.

Ключові слова: магнітне поле, магнітна індукція, градієнт магнітної індукції, магнітний потік, електрорушійна сила, магнітофорез, магнітопунктура.

Вступ. У спектрі частот різні місця займають радіохвилі, світло, рентгенівське випромінювання і інші електромагнітні коливання. Їх зазвичай характеризують нерозривно пов'язаними між собою електричними і магнітними полями. Проте за певних умов електрична і магнітна складові стають практично незалежними, і їх можна розглядати окремо. Роздільна дія електричного і магнітного полів - поля конденсатора і поля котушки - спостерігається при порівняно повільній їх зміні в так званій ближній зоні (зоні індукції), яка характеризується умовою $R \ll \lambda$ де R - найбільші габарити об'єкту або найбільша відстань від джерела поля, λ - довжина хвилі. У ближній зоні електромагнітна хвиля не сформована, випромінювання не відбувається, і поле швидко убуває у міру віддалення від джерела. Знаючи довжину хвилі в кілометрах, легко знайти частоту, що відповідає їй, по формулі: $f = 300/\lambda$ кГц. Так, наприклад, $f = 1$ кГц при $\lambda = 300$ км або $f = 10$ МГц при $\lambda = 30$ м.

Постановка проблеми. «Магнітоterapia» (лікування магнітним полем) і «магнітобіологія» (біологічна дія магнітним полем) - терміни, що відносяться до низькочастотного діапазону. Найменша довжина хвилі в цьому діапазоні складає 10 км (відповідно частота 30 кГц), що набагато перевищує розміри живих об'єктів і відстань від них до джерел магнітного поля. Отже, в низькочастотному діапазоні дія на біологічні об'єкти відбувається у ближній зоні, і можна розглядати окремо електричні і магнітні поля. Так для лікування за допомогою електро-медичних апаратів використовують постійне електричне поле (франклінізація), магнітне поле 10-40 МГц (індуктотермія); електричне поле 25-50 МГц (УВЧ-терапія). Можливість роздільної дії електричного і магнітного полів зберігається аж до високих частот.

Низькочастотне магнітне поле здатне проникати без спотворення і загасання не лише через повітря, але і через воду, скло, папір, дерево, тканину і інші немагнітні середовища. На відміну від електричного поля низької частоти, високочастотних полів, ультразвукових коливань низькочастотне магнітне поле вільно пронизує живі тканини. Питання про прозорість біологічних об'єктів заслуговує спеціального розгляду.

Передусім слід з'ясувати, є біологічний об'єкт діелектриком або провідником. Відомо, що до частот близько 10 МГц тканини тіла можна розглядати як провідники. Критерієм властивостей реального середовища, що проводять, є величина тангенса кута втрат:

$$\left. \begin{aligned} \operatorname{tg} \delta \ll 1 & \text{ для діелектрика,} \\ \operatorname{tg} \delta \gg 1 & \text{ для провідника,} \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

$$\operatorname{tg} \delta = \sigma / (\omega \varepsilon), \quad (2)$$

де $\operatorname{tg} \delta$ - тангенс кута втрат; σ - питома провідність, См/м;

$$\omega = 2\pi f, \quad (3)$$

$$\varepsilon = \varepsilon_0 \varepsilon_r, \quad (4)$$

де ω - кругова частота, Гц; ε - діелектрична проникність, Ф/м; ε_0 - електрична постійна, Ф/м;

ϵ_r - відносна діелектрична проникність. З формули (2) виходить, що тільки в ідеальному діелектрику ($\sigma = 0$) немає втрат; у реальному середовищі втрати залежать від відношення $\sigma/(\omega\epsilon)$. Оцінимо його величину для живого організму. З цією метою використовуємо значення електричних параметрів тканин тварин і людини, які в низькочастотному діапазоні, що цікавить нас, відомі при частотах 0,01; 0,1; 1 і 10 кГц. Оскільки спостерігається монотонне збільшення або зменшення приведених параметрів з частотою, розрахунки досить виконати тільки для крайніх частот - 10 Гц і 10 кГц.

Підставивши вирази (3) і (4) у формулу (2) і взявши до уваги значення електричної постійної, цю формулу можна представити в іншому виді: для 10 Гц

$$\operatorname{tg}\delta = 1,8 \cdot 10^9 \sigma / \epsilon_r \quad (2a)$$

і для 10 кГц

$$\operatorname{tg}\delta = 1,8 \cdot 10^6 \sigma / \epsilon_r \quad (2b)$$

Виберемо тканини з найменшим відношенням σ/ϵ_r , що, як випливає з формул (1) і (2), найменш сприятливо для властивостей, що проводять: при 10 Гц $\sigma = 1/9,6$ См/м і $\epsilon_r = 10^7$, а при 10 кГц $\sigma = 1/6$ См/м і $\epsilon_r = 10^5$. Підставляючи ці дані у формули (2a) і (2b), отримаємо при 10 Гц $\operatorname{tg}\delta = 19$, а при 10 кГц $\operatorname{tg}\delta = 3$, що відповідно до умови (1) підтверджує властивості живої тканини, що проводить, в розглянутому діапазоні.

Для судження про проникнення поля в провідник визначають глибину проникнення :

$$\Delta = \sqrt{2/(\omega\mu\sigma)}, \quad (5)$$

$$\mu = \mu_0\mu_r, \quad (6)$$

де Δ - глибина проникнення, м; μ - магнітна проникність, Гн/м; μ_0 - магнітна постійна, Гн/м; μ_r - відносна магнітна проникність. Найменша глибина проникнення виходить для тканин з найбільшою $\sigma = 1/0,6$ См/м. Підставляючи у формулу (5) ці значення, вирази (3), (6), магнітну постійну і маючи на увазі $\mu_r = 1$, що справедливо для усіх немагнітних середовищ, отримаємо $\Delta = 390/\sqrt{f}$ м, де f - частота, Гц. Звідси при 10 Гц глибина проникнення магнітного поля в живий організм складає не менше 120 м, а при 10 кГц - не менше 3,9 м, що набагато перевищує габарити людини і більшість біологічних об'єктів.

Знаючи глибину проникнення, легко розрахувати послаблення інтенсивності поля в об'єкті на відстані R^* від поверхні тіла, скориставшись формулою $1 - e^{-R^*/\Delta}$. При виборі R^* виходимо з того, що зона дії штучного магнітного поля поширюється на відстань, що не перевищує 20 см. Тоді $R^* = 0,2$ м, і при 10 Гц поле послаблюється на 0,002 (0,2%), а при 10 кГц - на 0,050 (5%), тобто в межах помилки виміру інтенсивності поля для магнітотерапії і магнітобіології.

Слід підкреслити, що приведені вище розрахунки, що показали справедливості твердження про прозорість біологічних об'єктів в низькочастотному магнітному полі, отримані при виборі тканин з найменш сприятливими значеннями питомої провідності і діелектричної проникності. У інших тканин ці параметри часто у багато разів відрізняються від використаних, тому фактичне загасання магнітного поля менше розрахованому і практично не відчувається в низькочастотному діапазоні.

Інтенсивність магнітного поля визначається магнітною індукцією B або напруженістю H . Ці характеристики є векторними і, отже, визначаються абсолютною величиною (модулем) і напрямом. Їх зв'язок виражається формулою $\vec{B} = \mu \cdot \vec{H}$, де μ визначена у виразі (6). Згідно системи СІ магнітна індукція вимірюється в тесла (Тл), а напруженість магнітного поля - в амперах на метр (А/м), в системі СГС індукція вимірюється в гаусах (Гс), а напруженість в ерстедах (Е), причому 1 мТл=10 Гс, а 1 А/м = 0,0126 Е. Для немагнітних середовищ магнітна індукція 1 мТл відповідає напруженості поля 10 Е, а магнітна індукція 1 нТл - напруженості поля 1 γ.

Інтенсивності відомих природних і штучних полів істотно відрізняються. Так, магнітні поля людини вимірюються в пікотеслах, магнітне поле Землі не перевищує 50 мкТл, промислових магнітотерапевтичних пристроїв - 100 мТл, в комп'ютерних томографах використовується поле інтенсивністю в декілька Тл, а поле деяких зірок наближається до 1

ГТл. Відповідні напруженості приблизно складають $8 \cdot (10^{-7} + 10^{-5})$ А/м, 40 А/м, 80 кА/м, близько 1000 кА/м і $8 \cdot 10^{11}$ кА/м. Одиниці напруженості магнітного поля в системі СІ виявилися незручними, широкого поширення не отримали, і на практиці їх використовують в основному для характеристики феромагнітних матеріалів або при їх дослідженні.

Важливим параметром магнітного поля є градієнт магнітної індукції:

$$\text{grad} \left| \vec{B} \right| = \frac{\partial B}{\partial n} \vec{n},$$

вектор, що має рівну $\partial B / \partial n$ довжину і спрямований по нормалі \vec{n} до поверхні, рівної магнітної індукції (тобто до поверхні, для якої $B = \text{const}$), у бік найбільшого зростання магнітної індукції. Градієнт - диференціальна величина, пов'язана з нескінченно малим переміщенням в поле. У системі СІ градієнт магнітної індукції вимірюється в теслах на метр (Тл/м) або в мілітеслах на сантиметр (мТл/см), причому 1 Тл/м = 10 мТл/см.

У деяких роботах дія магнітного поля характеризується магнітним потоком Φ - потоком вектору магнітної індукції крізь поверхню S . Для плоскої поверхні в однорідному магнітному полі магнітний потік розраховується досить просто: $\Phi = B_n \cdot dS$, де B_n - складова магнітної індукції, перпендикулярна поверхні, Тл; S - площа поверхні, м². Якщо ж магнітне поле неоднорідного, дана поверхня розбивається на нескінченно малі елементи dS , і магнітний потік через поверхню S розраховується шляхом інтеграції: $\Phi_S = \int B_n \cdot dS$. Магнітний потік - скалярна величина. У системі СІ він вимірюється у веберах (Вб), а в системі СГС - в максвеллах (Мкс), причому 1 Вб = 10⁸ Мкс.

Слід зазначити, що ріст інтенсивності магнітного поля не рівнозначний збільшенню біологічного ефекту. В деяких випадках можлива і зворотна залежність: збільшення набряку, уповільнення загоєння, а також уповільнення розсмоктування раніше введених феромагнітних часток при збільшенні інтенсивності поля.

Однорідне і неоднорідне магнітне поле. Якщо магнітна індукція не змінюється в просторі, поле називається однорідним. У однорідному полі вектори магнітної індукції мають однакову величину і напрям, так що градієнт магнітної індукції дорівнює нулю. Для створення однорідного поля вживають спеціальні заходи, але об'єм його завжди залишається обмеженим. Характеризуючи однорідне поле, вказують не лише величину і напрям вектору магнітної індукції по відношенню до даного об'єкту, але і об'єм поля, а також неоднорідність в цьому об'ємі - найбільше процентне відхилення магнітної індукції від номінальної.

Однорідним можна рахувати поле в центральній частині порожнини порівняно довгого соленоїда (у області його геометричного центру). Неоднорідність такого поля можна зменшити шляхом потовщення кінців соленоїда або, навпаки, передбачивши паз в його середній частині. Використання порожнини соленоїда обмежене тим, що об'єкт не видно, доступ до нього ускладнений, так що проведення досліджень істотно ускладнюється.

Поле, близьке до однорідного, можна отримати між плоскими полюсами постійного магніту або електромагніту, якщо об'єм і лінійні розміри їх значно перевищують відстань між полюсами і габарити об'єкту. Реалізація цього поля можлива в дуже обмеженому об'ємі, оскільки розведення полюсів або недостатня різниця між площею поверхні полюса і габаритами об'єкту призводить до росту неоднорідності.

Відомо, що найкращий спосіб отримання однорідного поля в заданому об'ємі і із заданою неоднорідністю полягає у використанні так званих котушок, що компенсуються, з яких найбільш поширені котушки Гельмгольца (рис. 1). У центрі системи котушок Гельмгольца виходить однорідне поле з регульованою інтенсивністю, зручне для забезпечення життєдіяльності біологічного об'єкту і маніпуляцій з ним.

У усіх розглянутих випадках збільшення об'єму однорідного поля пов'язане з ростом габаритів і маси пристрою, а для соленоїда і котушок, що компенсуються, - ще і з ростом споживаної потужності.

Джерело однорідного поля - найважливіший блок сучасного комп'ютерного томографа. Однорідні магнітні поля використовують в експериментах з мікроорганізмами, рослинними об'єктами, дріжджами. Проте для магнітотерапії однорідне поле не характерне. У усіх відомих промислових магнітотерапевтичних пристроях застосовують неоднорідне поле. Характеризувати його значно складніше, ніж однорідне, оскільки магнітна індукція і її градієнт різні в усіх точках. Виходячи з цього, напрям і величина вектору магнітної індукції в одній точці, достатні для характеристики однорідного поля, не дозволяють ні відтворити, ні зіставити

неоднорідне поле з полями інших пристроїв. Працюючи з неоднорідним полем, необхідно знати магнітну індукцію в різних точках, займаних біологічним об'єктом, і це завдання вирішується за допомогою картини поля.

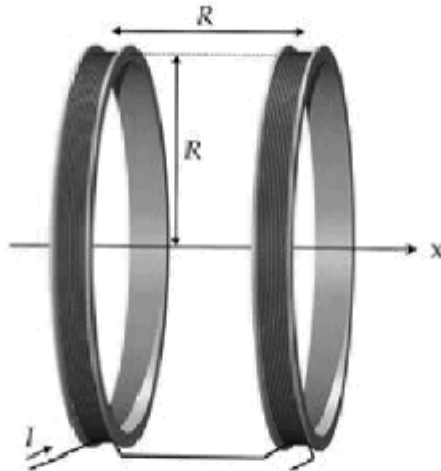


Рис. 1. Система котушок Гельмгольца

У експериментах з біологічними об'єктами доведено, що неоднорідне магнітне поле діє сильніше, ніж однорідне.

Постійне магнітне поле. Якщо магнітна індукція не міняється з часом, поле називається постійним. У усіх його точках вектор магнітної індукції залишається незмінним за величиною і напрямом. Частота зміни постійного поля дорівнює нулю.

Джерелами постійного магнітного поля може бути постійний магніт або індуктор, через який проходить постійний струм. Для живлення індукторів хімічні джерела струму - акумулятори, і тим більше сухі елементи практично не використовують, оскільки вони не забезпечують необхідний розрядний струм. Крім того, в процесі експлуатації хімічні джерела струму помітно «підсаджуються», і через короткий час сила струму через індуктор виявляється меншою, ніж на початку експлуатації. Як правило, для живлення індуктора використовують випрямлячі. До їх недоліків відноситься наявність пульсацій, тобто періодичній змінній складової, від якої, як правило, неможливо позбавитися. Тому на практиці постійне поле індуктора, що живиться від випрямляча, має змінну складову, часто досить значиму. Кількісно вона характеризується коефіцієнтом пульсацій, який дорівнює процентному відношенню амплітуди змінної складової до випрямленого струму.

У джерелах постійного магнітного поля розрізняє північний (N) і південний (S) полюси. Є багато даних, згідно з якими біологічна дія цих полюсів неоднакова. Так, якщо над клітиною з мишами розташовується північний полюс, а під нею - південний, виживаність тварин виявляється в півтора рази вище, ніж при зворотному розташуванні полюсів. При лікуванні, у тому числі при магнітопунктурі відзначається седативна дія зверненого до тіла північного полюса і збудлива, тонізуюча дія південного полюса. Достовірна оптимізація психофізіологічного стану людини-оператора досягається за допомогою тривалої (впродовж декількох діб) магнітопунктури, коли до біологічно активних точок звернений південний полюс. Результат дії північного полюса в цьому випадку мало відрізняється від контролю. Різна дія полюсів відбита і у виразах «вода південного полюса», «вода північного полюса».

В якості джерел постійного магнітного поля в сучасних магнітотерапевтичних пристроях використовують постійні магніти багатополюсні (наприклад, листові магнітофорні аплікатори або з однією - двома парами полюсів (двополюсні медичні магніти; магнітотерапевтичні медичні бужі; магнітні пігулки).

Змінне магнітне поле: синусоїдальне, пульсуюче, імпульсне. Змінне магнітне поле використовують у більшості відомих промислових магнітотерапевтичних пристроїв. У змінному полі в усіх точках одночасно за одним і тому ж законом змінюються величина і напрям вектору магнітної індукції, тільки величина або тільки напрям. Частота зміни такого поля завжди відрізняється від нуля.

Внаслідок помітної індуктивності не може бути миттєвих змін струму в ланцюзі індуктора, що зумовлює можливість відмінності кривої струму від кривої прикладеної напруги. Тому про закон зміни поля індуктора судять по кривій струму (не напруга!) живлення, і перевірку форми цієї кривої доцільно передбачати в промислових магнітотерапевтичних апаратах.

Синусоїдальне магнітне поле - окремий випадок змінного поля, коли вектор магнітної індукції змінюється за синусоїдальним законом і спостерігаються періодичні зміни його величини і напрямку. Синусоїдальне поле виходить в результаті живлення індуктора від промислової мережі або від низькочастотного генератора синусоїдальної напруги. Крива струму через індуктор в цьому випадку зазвичай мало відрізняється від кривої напруги. Синусоїдальне поле використовують у більшості сучасних магнітотерапевтичних апаратів, воно було застосоване в перших апаратах на початку століття.

Пульсуюче магнітне поле - окремий випадок змінного поля, коли вектор магнітної індукції з часом міняє величину, але не міняє напрямку. Джерелом такого поля є індуктор, що живиться від пульсуючої напруги, що виходить в результаті одно- або двонапівперіодного випрямлення. Крива струму через індуктор може в цьому випадку істотно відрізнитися від кривої напруги.

Імпульсне магнітне поле - теж окремий випадок змінного поля. Воно характеризується формою імпульсів струму, що проходить через індуктор (але не імпульсів напруги, від якої живиться індуктор), тривалістю імпульсів і частотою або періодом їх повторення. Форма імпульсу струму може бути довільною, моно- або біполярною, але, як правило, не буває прямокутної, хоча для отримання імпульсного поля найчастіше використовують прямокутні монополярні імпульси напруги. Річ у тому, що струм через індуктор не може змінитися миттєво.

Безперервне і перервне магнітне поле. Режим живлення індуктора може бути безперервним або перервним. Перервний режим живлення був уперше застосований і обґрунтований в Румунії. У проведених там фізіологічних і гістохімічних дослідженнях було показано, що безперервне поле (рис. 2, а) чинить седативну дію, а перервне поле (рис. 2, б, в, г) - збудлива, стимулююча дія, яка особливо посилюється в неритмічному режимі, коли міняється тривалість посилок і пауз (рис. 2, г). Дію безперервних полів зв'язують з переважно анаболічними відновними процесами обміну, що характеризуються асиміляцією, а дія перервних полів - переважно з катаболічними окислювальними процесами обміну, що характеризуються дисиміляцією.

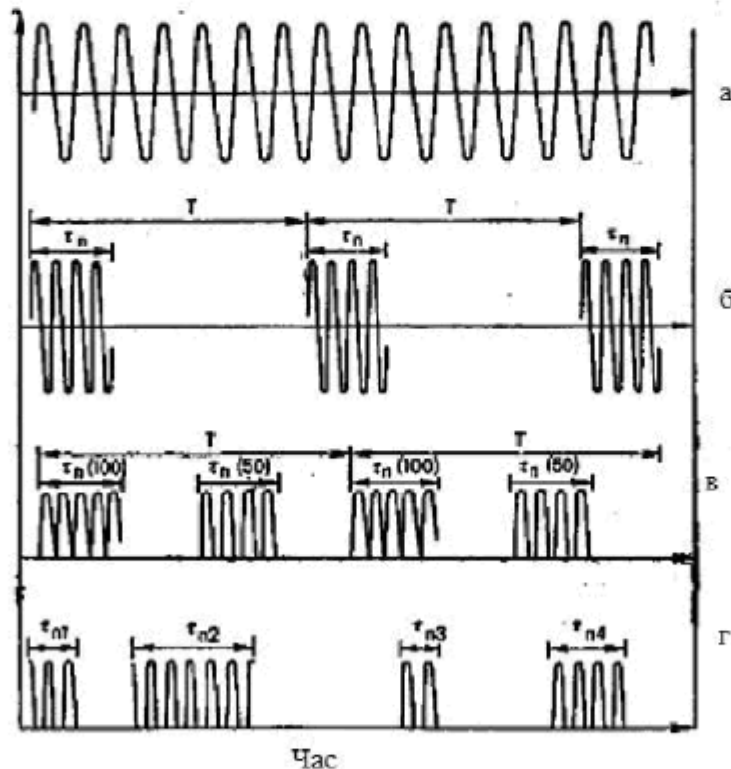


Рис. 2. Криві струму, що проходить через індуктор: у безперервному синусоїдальному полі (а); у переривчастому синусоїдальному ритмічному полі (б); у переривчастому пульсуючому ритмічному полі (в); у переривчастому пульсуючому неритмічному полі (г): Т - період посилки; τ_n - тривалість посилки; $\tau_n(100)$ - тривалість посилки з частотою 100 Гц; $\tau_n(50)$ - тривалість посилки з частотою 50 Гц; $\tau_{n1}, \tau_{n2}, \tau_{n3}, \tau_{n4}$ - різні тривалість посилок.

У безперервному і переривчастому режимах можливе чергування полів з різними законами зміни в часі, наприклад полів з частотами 50 і 100 Гц. Переривчастий режим

характеризується тривалістю посліжки і паузи, сума яких складає період посліжки. Якщо при цьому закони зміни поля в посліжках відрізняються, період посліжок подовжується (рис. 2, в).

Електромагнітна індукція. Дія магнітного поля на живі об'єкти практично завжди супроводжується більш менш вираженим явищем електромагнітної індукції. Електромагнітну індукцію враховують при з'ясуванні механізмів дії поля, беруть до уваги при забезпеченні електробезпеки роботи з індукторами, застосовують в магнітних вимірах.

Електромагнітна індукція проявляється в тому, що зміна магнітного поля, що перетинає виток (замкнений провідник), викликає появу електричного струму. При w витках котушки без сердечника електрорушійну силу індукції обчислюють за формулою:

$$E^{**} = -wS\partial B_n / \partial t, \quad (7)$$

а середнє значення її при короткочасній зміні магнітного поля по формулі:

$$E_{cp}^{**} = -wS\Delta B_n / \Delta t, \quad (8)$$

де S - площа витка, m^2 ; $\partial B_n / \partial t$ і $\Delta B_n / \Delta t$ - диференціальна і середня швидкості зміни нормальної складової магнітної індукції (перпендикулярній площі S), Тл/с. Так, наприклад, якщо в котушці діаметром 10 см, намотаною 600 витками, індукція збільшується від 0 до 50 мТл впродовж 0,2 с, то відповідно до формули (8) середнє значення ЕРС індукції, наведеної в цій котушці, обчислюватиметься таким чином:

$$E_{cp}^{**} = 600\pi(0,1)^2 50 \cdot 10^{-3} / (4 \cdot 0,2) = 1,25 \text{ В.}$$

У тому випадку, коли магнітне поле мінється за синусоїдальним законом, так що $B = B_a \cdot \sin \omega t$, легко розрахувати приватну похідну:

$$\frac{\partial B_n}{\partial t} = \omega B_a \cos \omega t.$$

Тоді з формули (7) виходить $E^{**} = -\omega w S B_a \cos \omega t$, а амплітуда наведеної ЕРС обчислюється за формулою:

$$E_a^{**} = \omega w S B_a = 2\pi f w S B_a, \quad (9)$$

де f - частота зміни поля, Гц; wS - сума площ усіх витків котушки, m^2 ; B_a - амплітудне значення магнітної індукції, Тл.

ЕРС індукції виникає і при взаємному переміщенні замкнутого провідника і що перетинає його однорідного магнітного поля. Так, ЕРС індукції з'являється на стінках судин в однорідному полі, що перетинає їх. Вона залежить від інтенсивності цього поля, калібру $2R^*$ посудини і швидкості руху (v) рідини, що проводить:

$$E^{**} = -2R^* v B_a,$$

де $2R^* v$ - площа, що описується рідиною, що проводить, в одиницю часу. Наприклад, якщо однорідне магнітне поле з індукцією 200 мТл під прямим кутом перетинає посудину діаметром 0,5 см, в якому із швидкістю 10 см/с рухається кров, то $E^{**} = 0,5 \cdot 10^{-2} \cdot 0,1 \cdot 200 \cdot 10^{-3} = 10^{-4} \text{ В} = 0,1 \text{ мВ}$. ЕРС може бути використана при тромбуванні аневризми. ЕРС індукції з'являється також у пасажирів літаків і космічних кораблів, що перетинають магнітне поле Землі. Знак «-» в проведених вище формулах свідчить про те, що ЕРС індукції завжди спрямована протилежно напрузі, яка була в ланцюзі. Далі знак «-» ми опускаємо.

Тепло та вібрація. У усіх випадках застосування індукторів тепло і вібрації підлягають контролю, оскільки часто супроводжують дію магнітним полем. Вібрації зазвичай проявляються відразу після включення пристрою, а нагрів індуктора відбувається поступово і може істотно збільшитися з часом. У промислових апаратах температуру поверхні індуктора перевіряють не раніше чим після 6-годинної експлуатації.

Кількість тепла, що розсіюється в одиниці об'єму (V) обмотки індуктора за 1 с, складає

$$W/V = j^2 \rho. \quad (10)$$

Отже, при відомому матеріалі обмотувального дроту, міді або алюмінії з питомим опором ρ , температура поверхні індуктора залежить тільки від щільності j струму, що проходить через нього, і збільшується пропорційно її квадрату. Оскільки з багаторічного досвіду експлуатації електротехнічних пристроїв - електричних машин, трансформаторів та ін. - відомо, якого нагріву можна чекати в конкретних умовах роботи, допустима щільність струму зазвичай

заздалегідь відома. Якщо її занизити, перевищення температури поверхні індуктора над температурою довкілля може бути незначним. Проте при цьому зменшується і інтенсивність магнітного поля. При розробці магнітотерапевтичних апаратів вибирають таку щільність струму, при якій з одного боку, допускається невеликий нагрів індуктора, при якому ще не виникають неприємні відчуття у дотичного до його поверхні пацієнта, але з іншого боку, зберігається достатня інтенсивність поля.

Вібрації індуктора пов'язані в основному з живленням його змінним струмом - синусоїдальним, пульсуючим або імпульсним. Найбільша амплітуда вібрацій зазвичай відповідає частоті зміни магнітного поля, а потім зменшується у міру зростання номера гармоніки. Для зниження вібрацій усі деталі індуктора, включаючи магнітопровід, якщо він є, надійно стягують і закріплюють. Якщо ж навпаки, передбачається поєднана дія магнітного поля і вібрацій, використовують індуктор-електромагніт і в конструкції спеціально передбачають незакріплені деталі.

Відчутні теплове і вібраційне дії, окрім дискомфорту, обумовлюють протипоказання, які обмежують лікувальне застосування магнітного поля при деяких супутніх захворюваннях, - в літньому віці, при індивідуальній непереносимості цих чинників і тому подібне. У сучасних апаратах поєднують дію магнітного поля з теплом і вібраціями зазвичай не передбачають, хоча вони в якійсь мірі мають місце. Слід зауважити, що саме по собі магнітне поле під час процедури не відчувається пацієнтом. При поєднанні його з будь-яким іншим чинником, що відчувається людиною, у тому числі з теплом і вібраціями, можливий психогенний ефект. Передбачені індукторотримачі, що забезпечують безконтактну (дистанційне) дію. Щільність струму не перевищувала $1,5 \text{ А/мм}^2$ в порожнистому індукторі і $2-2,5 \text{ А/мм}^2$ - в інших.

Магнітофорез. Завдяки тому що суха і волога середовища однаково «прозорі» для магнітного поля, можна при проведенні процедури використати розчини лікарських речовин і здійснювати магнітофорез. У офтальмологічній практиці магнітофорез реалізують як в постійному, так і в змінному полі. Перед процедурою лікування магнітним полем призначену при конкретному захворюванні лікарську речовину в розчині інсталиують в кон'юнктивний мішок або змочену цим розчином ватну турунду закладають за повіки, або заповнену розчином ванну наближають до ока. В порівнянні з дифузійною проникнення лікарського препарату через рогівку при магнітофорезі значно збільшується, причому найбільшу концентрацію препарату дає застосування «ванночкової» методики. На відміну від електро- і фонофорезу магнітофорез можна призначати в ранні терміни, з першого дня запального процесу або відразу після операції. При магнітофорезі не потрібно безпосередній контакт джерела поля з раневою поверхнею ока, оскільки лікування можна проводити при закритих повіках, через пов'язку, неферомагнітну ванну і тому подібне. Методика безболісна, що особливо істотно в дитячій практиці.

Магнітопунктура. Досвід використання різних видів рефлекторної терапії показує їх приблизно рівноцінну ефективність, оскільки «суть справи не в подразнику, яким можуть бути голка, тепло сигарети, масажуючий палець, промінь лазера, ультразвук, магнітне поле, електричний струм і так далі, а в області дії - периферичному рефлекторному елементі (акупунктурній точці), який є свого роду перетворювачем. І головне - роздратування має бути адекватним, достатнім для дії на периферичний рефлекторний елемент, але не надмірним, щоб не вивести його з ладу». Магнітопунктура - розділ пунктаційної фізіотерапії, що об'єднує методи впливу лікувальними фізичними чинниками на біологічно активні точки (рефлекторній мікрофізіотерапії). Магнітопунктуру зазвичай проводять за допомогою постійного магнітного поля «мікромагнітів» або «точкових магнітів», що мають, як правило, форму пігулок і виготовлених з оксидних магнітів (зазвичай на основі фериту барії). Діаметр їх складає 5-25 мм, а магнітна індукція у полюсів - від десятків до 150 мілітесла. При проведенні процедури область найбільшої інтенсивності магнітного поля має бути досить точно звернена до біологічно активної точки, оскільки зона дії малогабаритних магнітів невелика. Для фіксації на тілі пацієнта їх часто випускають на липкій підкладці. Лікувальна дія магнітопунктури посилюється, якщо час від часу доповнювати її легким натисканням. Оскільки є дані про різну дію північного і південного полюсів, в мікромагнітах їх відмічають забарвленням (синій - північний полюс, червоною - південний полюс), позначенням (N або «+» для північного полюса, S або «-» для південного полюса) або конструкцією (одна поверхня опукла, інша - плоска).

Магнітне поле і інфрачервоне випромінювання. Поєднана дія магнітного поля і інфрачервоного випромінювання досягається в результаті об'єднання цих джерел в одному пристрої, точніше у випромінюючій голівці. Для створення магнітного поля використовують

декілька постійних магнітів, а короткохвильове інфрачервоне випромінювання отримують від світлодіодів або лазерних діодів. Для лікування має значення щільність потоку випромінювання - потужність випромінювання, що доводиться на одиницю поверхні тіла пацієнта. Наукові основи методу доки ще не розроблені, а його практичне використання носить спорадичний характер. Слід зазначити, що при поєднаній дії розглянутих фізичних чинників тривалість лікувальної процедури визначається інфрачервоним випромінюванням: зазвичай вона не перевищує декількох хвилин, тоді як при такому ж магнітному полі у відсутність випромінювання тривалість процедури складає не менше 30 хв і часто у багато разів перевищує цей мінімум.

Висновок. На відміну від геомагнітного поля для штучного магнітного поля передусім характерні обмежений об'єм і, отже, локальна дія на пацієнта. Крім того, це поле однієї або декількох частот, що впливає короткочасно, рідко (процедури зазвичай тривають десятки хвилин в добу). І хоча воно неоднорідне, що повинне свідчити про більшу його ефективність в порівнянні з полем однорідним, навряд чи це можна затверджувати по відношенню до однорідного для людини геомагнітного поля. Тривала безперервна дія геомагнітного поля одночасно на усі глибоколежачі органи і тканини, біологічно активні точки, найважливіші області центральної нервової системи не може бути байдужим для організму, що підтверджують експерименти в ослабленому геомагнітному полі. Усе це говорить не лише про нашу залежність від природного геомагнітного поля, але і про складність усебічної кваліфікованої характеристики впливаючих магнітних полів.

Інформаційні джерела

1. Ливенсон А.Р. Электромедицинская аппаратура. – 5-е изд. – М.: Медицина, 2001. – 344 с.
2. Гуляр С.А., Лиманский Ю.П. Постоянные магнитные поля и их применение в медицине.- Киев: Институт физиологии им. А.А. Богомольца НАН Украины, 2006. – 319 с.
3. Алексеев А.Г., Корнев А.Е. Магнитные эластомеры. – М.: Химия, 2007.-240 с.
4. Buschow K.J.H. Physics of Magnetism and Magnetic Materials [Text] / K.J.H. Buschow, F.R. de Boer. – 2004. – P. 182.

Лапченко Ю.С., к.т.н., Дубина П.В.

Луцкий национальный технический университет

ОСОБЕННОСТИ НИЗКОЧАСТОТНОГО МАГНИТНОГО ПОЛЯ ДЛЯ МАГНИТОТЕРАПИИ

В этой статье описываются характеристики магнитного поля, назначенного для терапии низкочастотным магнитным полем, такие как магнитная индукция, интенсивность магнитного поля, градиент магнитной индукции, магнитный поток. Показано, что любой биологический объект полностью прозрачен для магнитного поля. Наведены разновидности магнитного поля: однородное и неоднородное магнитное поле, постоянное магнитное поле. Описаны разновидности переменного магнитного поля: синусоидальное, импульсное, пульсирующее. Показаны разновидности непрерывного и прерывного магнитного поля. Описано действие электродвижущей силы на биологический объект. Описано тепло и вибрация как связанные явления, сопровождающие действие магнитного поля. Обоснованы такие медицинские процедуры, как магнитофорез и магнитопунктура. Наведена возможность комплексного влияния магнитного поля и инфракрасного излучения.

Ключевые слова: магнитное поле, магнитная индукция, градиент магнитной индукции, магнитный поток, электродвижущая сила, магнитофорез, магнитопунктура.

Y. Lapchenko, P. Dubyna

Lutsk national technical university

FEATURES OF LOW-FREQUENCY MAGNETIC FIELDS FOR MAGNETIC THERAPY

This article describes the characteristics of the magnetic field therapy for low-frequency magnetic field, such as the magnetic induction, intensity of the magnetic field, the gradient of the magnetic induction, magnetic flux. It is shown that any biological object is completely transparent to the magnetic field. Are the magnetic field variety: uniform and non-uniform magnetic field, the constant magnetic field. Describe the variety of AC magnetic fields: sinusoidal, pulse, the pulsating. Showing a variety of continuous and non-continuous of the magnetic field. Describes the effect of induction electromotive force on biological object. Describes the heat and vibration, as related phenomena that accompany the action of the magnetic field. Informed medical treatments such as magnetophoresis and magnetopuncture. Are able to join the influence of magnetic field and infrared radiation.

Keywords: magnetic field, magnetic induction, the gradient of the magnetic induction, magnetic flux, electromotive force, magnetophoresis, magnetopuncture.