

**Министерство здравоохранения Республики Беларусь  
минский государственный медицинский институт**

**В. П. Морозов**

**ФИЗИЧЕСКИЕ ПРИНЦИПЫ ВЫСОКОЧАСТОТНОЙ  
ЭЛЕКТРОТЕРАПИИ**

**Учебно-методическое пособие  
по медицинской и биологической физике  
для студентов медицинских ВУЗов**

Минск, 1998 г.

ББК

УДК

Рецензент - заведующий кафедрой реабилитации и физиотерапии МГМИ,  
профессор Г.Е.Багель

**Морозов В.П.**

**Физические принципы высокочастотной электротерапии.**

Учебно-методическое пособие по медицинской и биологической физике для студентов медицинских ВУЗов: Минск, 1998 г. - 23 с.

Издание учебного пособия обусловлено недостатком подобного рода учебно-методической литературы. Пособие составлено таким образом, что при относительно небольшом объеме учебного материала в нем дается необходимая разносторонняя информация о высокочастотной электротерапии. В пособии рассмотрены механизмы воздействия электромагнитного излучения высокой частоты на биологические объекты; электрические свойства биологических тканей; конкретные методы высокочастотного воздействия и их медицинские применения.

В пособии также описана методика лабораторной работы по УВЧ-терапии.

Предназначено для студентов 1-го, 5-го и 6-го курсов медицинских ВУЗов и является полезным при изучении медицинской и биологической физики, а также физиотерапии и медицинской реабилитации.

Утверждено ЦМК МГМИ

© Минский государственный  
медицинский институт, 1998

# ФИЗИЧЕСКИЕ ПРИНЦИПЫ ВЫСОКОЧАСТОТНОЙ ЭЛЕКТРОТЕРАПИИ

## Введение

**Высокочастотная (ВЧ) электротерапия** - это воздействие на человеческий организм электромагнитным излучением в диапазоне частот  $10^5$  -  $10^{11}$  Гц.

**Первичный физический механизм** - воздействие переменного электромагнитного поля (ЭМП) на заряженные частицы (электроны, ионы); молекулы, обладающие дипольным моментом (например,  $H_2O$ ) и большие белковые, не имеющие дипольного момента.

Два эффекта воздействия: **тепловой**, когда за счет локального повышения температуры изменяются скорость и характер протекания биохимических реакций; и **нетепловой (специфический)**, когда происходят различные внутримолекулярные, физико-химические изменения, или структурные перестройки молекул, которые изменяют функциональное состояние клеток. В качестве примера можно указать на выстраивание в цепочки, ориентированные параллельно электрическим силовым линиям, эритроцитов, лейкоцитов и некоторых других клеток и частиц, ориентирование по полю боковых ветвей белковых макромолекул и др.

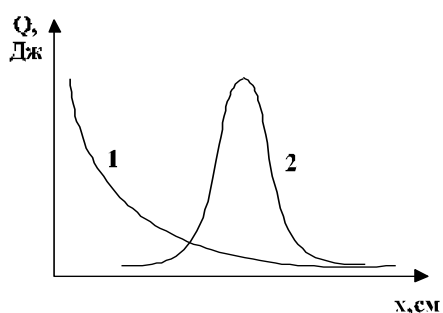


Рис.1. Пространственное распределение количества теплоты, выделяющейся в организме при теплопередаче (1) и при некотором ВЧ-воздействии (2).

Нагревание тканей токами и полями высокой частоты происходит не за счет передачи тепла, подведенного к поверхности тела, а за счет его непосредственного выделения в расположенных внутри тела тканях и органах. Это позволяет в значительной степени исключить теплоизолирующее действие кожи и подкожно-жировой клетчатки, а так же терморегуляционное действие системы кровообращения, значительно ослабляющее передачу тепла в глубь с поверхности тела.

Удельное количество теплоты ( $q$ ), выделяюще-

еся в единицу времени в единице объема тех или иных органов и тканей организма, зависит как от параметров воздействия, так и от электрических свойств самих тканей:

$$q = f(I, E, B, \nu, \dots \rho, \epsilon), \quad (1)$$

параметры      параметры  
внешнего      ткани  
воздействия

где  $I$  - сила тока,  $E$  - напряженность электрического поля,  $B$  - напряженность магнитного поля,  $\nu$  - частота,  $\rho$  - удельное сопротивление,  $\epsilon$  - диэлектрическая проницаемость.

При этом частота и методика воздействия (доминирует ли электрическая или магнитная компонента электромагнитного поля ЭМП) определяют "термоселективное" действие, т.е. преимущественное выделение тепла в определенных тканях (рис.1). Изменение остальных внешних параметров регулирует величину теплового эффекта.

## **§1. Электрические свойства биологических тканей и их зависимость от частоты электромагнитного излучения**

Электрические свойства биологических тканей характеризуются диэлектрической проницаемостью ( $\epsilon$ ) и удельным сопротивлением ( $\rho$ ). Магнитные свойства биологических тканей выражены очень слабо и при рассмотрении механизма ВЧ-воздействия не учитываются. Электрические характеристики различных мягких тканей определяются содержанием в них воды и растворенными в ней солями (т.е. электролитами), ионы которых обуславливают проводимость как самого раствора, так и тканей. Однако, наличие взвеси клеток, окруженных тонкой плохопроводящей мембраной (диэлектрик), позволяет говорить об упрощенной эквивалентной электрической схеме живой ткани в виде параллельного соединения конденсатора ( $C$ ) и активного сопротивления ( $R$ ). На низких частотах (до десятков кГц) ионный ток протекает только через внеклеточную среду. Происходит эффективная перезарядка емкости клеточных мембран ( $\rho, \epsilon$  большие).

С увеличением частоты за счет уменьшения емкостного сопротивления мембраны ( $X_c = 1/\omega c$ ) внутриклеточная среда начинает принимать участие в проведении ионного тока, что приводит к уменьшению удельного сопротивления. В это же время емкости мембран не успевают полностью заряжаться, в результате чего диэлектрическая проницаемость ткани так же уменьшается. Мембраны клеток перестают оказывать влияние на электрические свойства тканей при частотах выше 100 МГц, когда емкостное сопротивление мембраны становится малым по сравнению с сопротивлением внутриклеточной жидкости.

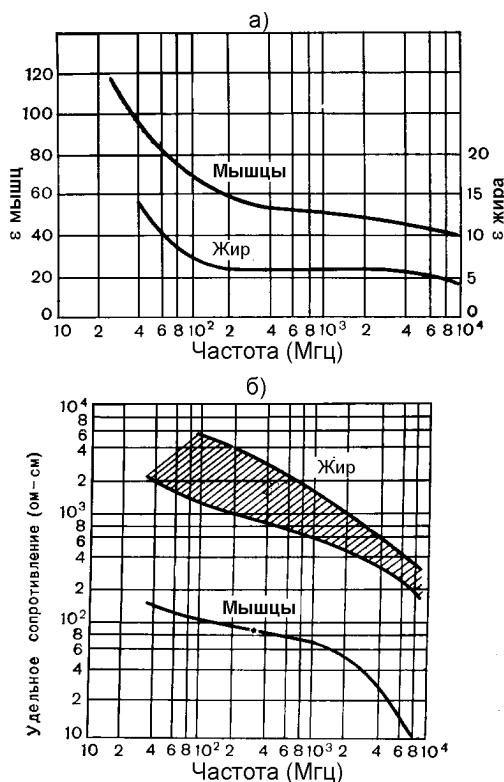


Рис.2. Зависимость диэлектрической проницаемости ( $\epsilon$ ) и удельного сопротивления ( $\rho$ ) мышечных и жировых тканей от частоты.

При дальнейшем повышении частоты на электрические свойства тканей влияют полярные молекулы воды (диполи), ориентация которых в направлении поля сопровождается потерями энергии, которые называются диэлектрическими. Так как ориентация полярных молекул происходит не мгновенно, а требует некоторого конечного времени - времени релаксации (для молекул воды 10<sup>-11</sup> с), то изменения  $\epsilon$  и  $\rho$  тканей, связанные с полярными свойствами молекул воды, существенно сказываются на частотах выше 10<sup>10</sup> Гц. Поскольку частота является определяющим фактором "термоселективности" ВЧ-воздействия, рассмотрим механизм частотной зависимости  $\epsilon$  и  $\rho$ . Все ткани тела

в соответствии с содержанием в них воды могут быть разделены на три основные группы: жидкие ткани (кровь, лимфа) - водная суспензия клеток и белковых молекул; мышечные и им подобные ткани внутренних органов (сердце, почки, печень и др.), содержащие большое количество воды, но имеющие уплотненную структуру; ткани с малым содержанием воды (жир, кости).

Таблица I

Ткани и органы	длина волны, м
кровь	2,6
кожа	5
печень	5,5
мозг	11
жир	35

Ионный состав и число полярных молекул в разных тканях отличаются друг от друга, поэтому при одной и той же частоте (длине волны) в тканях возникает неодинаковое количество тепла. В таблице 1 указаны длины волн, на которые приходится максимум тепловыделения в различных тканях. Фактически будут прогреваться все ткани, хотя несколько больше те, для которых длина волны внешнего воздействия ближе к селективной.

Распределение выделяющегося количества теплоты определяется частотой и методикой подвода энергии излучения (рис.3).

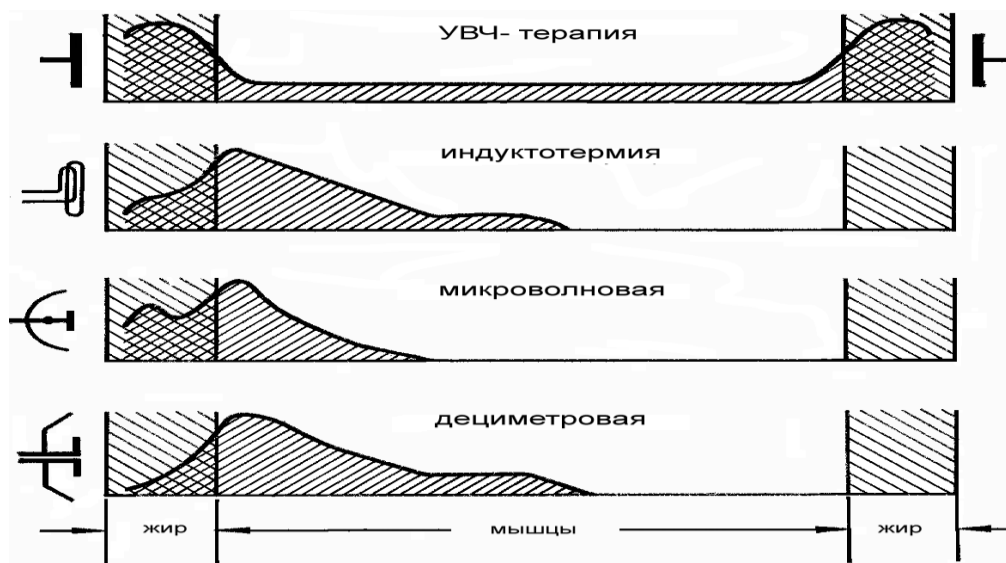


Рис.3. Графическое изображение соотношения количества энергии ЭМИ УВЧ- и СВЧ-диапазонов поглощаемых тканями.

## §2.Лечебные методы ВЧ-воздействия на органы и ткани

При рассмотрении лечебных методов ВЧ-воздействия на органы и ткани целесообразно придерживаться следующего плана: указание частотного диапазона, и других внешних параметров, анализа конкретного механизма и характера воздействия данного лечебного метода, обсуждения методики проведения физиопроцедуры, расчета (при необходимости) удельного количества выделяющейся теплоты; показаний и противопоказаний.

### 1. Токовое воздействие

#### 1.1. Дарсонвализация и ультратонотерапия

Местная (локальная) **дарсонвализация** - это воздействие импульсного переменного тока высокой частоты (110 кГц), высокого напряжения (20 кВ) и малой силы (0,02 мА) на определенные участки тела. Процедуре нетепловая.

Специфика действия: высокочастотный ток, подведенный к поверхности тела пациента с помощью полого стеклянного электрода различной формы, вызывает электрический разряд. Для замыкания цепи высокочастотного тока второй электрод не применяется. Ток проходит через распределенную емкость пациента на землю.

Механизм действия: при плотно прижатом контакте возникают разряды, вызывающие легкое раздражающее действие. С увеличением величины зазора между электродом и пациентом сила разряда возрастает переходя в искру, оказывающую существенное раздражающее, а иногда и легкое прижигающее воздействие. Во время проведения процедуры образуется незначительное количество озона и окислов азота. При некоторой конфигурации электрода наблюдается выраженный тепловой эффект. Основным эффектом при этом является раздражение рецепторов кожи или слизистой оболочки высокочастотным электрическим разрядом. Возникающая при этом афферентная импульсация поступает в ЦНС и рефлекторным путем оказывает действие на различные органы и системы организма.

Медико-биологические проявления: при этом возникает вазомоторная реакция: расширяются капилляры и артериолы, повышается тонус вен, усиливается кровообращение в артериальном и венозных руслах, улучшается трофика тканей и процессы регенерации. Под влиянием дарсонвализации происходит отчетливое обезболивающее, противовоспалительное, противозудное, спазмолитическое действие.

**Ультратонотерапия** - метод электролечения, при котором переменный ток надтоновой частоты (22 кГц) напряжением 3-5 кВ и выходной мощностью 10 Вт.

Механизм действия, методика и техника выполнения процедуры имеют много общего с местной дарсонвализацией. Однако, подаваемое при этом напряжение значительно ниже, что исключает проявление неприятного болезненного ощущения от искрового разряда. Это позволяет использовать данный метод лечения у детей младшего возраста.

## **1.2. Диатермия.**

**Диатермия** - прогревание тканей тела высокочастотным током (1,5-2 МГц) большой величины (до 2 А), проходящим между двумя контактно наложенными на поверхность тела металлическими электродами. Возможность использования теплового эффекта при таких параметрах импульса основана на снижении раздражающего действия переменного тока с повышением его частоты.

В основе физиологического эффекта диатермии лежит ее тепловое действие. Температура поверхностных тканей в области, подвергаемой воздействию, повышается

на  $2-3^{\circ}$ , незначительно повышается и температура всего тела. Раздражение тепловых рецепторов рефлекторно вызывает расширение сосудов. Под влиянием повышения температуры тканей в них усиливается активность биохимических процессов. Этому способствует активная гиперемия, в результате которой улучшаются кровоснабжение тканей, усиливается приток к ним питательных веществ, а также элементов, играющих защитную роль (фагоциты, лизины и т.п.). Регенерация костной ткани ускоряется. Происходит повышение проницаемости сосудистой стенки. Функции органов и систем усиливаются (например: в печени - углеводный, водный и пигментный обмен). Диатермия оказывает антиспастическое и выраженное болеутоляющее действие при малой силе тока, обусловленное понижением чувствительности болевых нервных окончаний. Антибактерицидное действие диатермии происходит за счет ослабления жизнедеятельности нетеплостойких микроорганизмов (гоно- и пневмококки) и мобилизации защитных сил организма.

Определим удельное количество выделяющейся теплоты. Расчет количества теплоты, идущего на нагревание ткани, основан на законе Джоуля-Ленца

$$Q = I^2 R t. \quad (2)$$

Преобразуем формулу, считая, что биологическая ткань расположена между двумя плоскими электродами с площадью  $S$ , находящимися на расстоянии  $l$  вплотную к ним. Пусть плотность тока  $j = I/S$  одинакова во всех точках ткани. Учитывая, что  $R = \rho l/S$  получаем

$$Q = I^2 R t = j^2 S^2 \rho l t / S = j^2 \rho V t, \quad (3)$$

где  $V = S l$  - объем ткани. Следовательно,

$$q = Q/V t = j^2 \rho. \quad (4)$$

Таким образом, при диатермии удельное количество выделяющейся теплоты пропорционально удельному сопротивлению. При частотных параметрах тока диатермии наибольшим удельным сопротивлением обладает жировая ткань; за нею следуют легкие, сухая кожа, тканевые жидкости, кровь и надкостница (см.табл.1). Это приводит к нежелательному распределению тепла по слоям тканей. Кроме того, при контактном наложении электродов непосредственно под ними (кожа, подкожно жировая клетчатка) имеет место повышенная плотность тока, иногда приводящая к ожогам; а в глубоко расположенных тканях пути тока разветвляются и плотность тока значительно снижается. Преимущественный нагрев поверхностных слоев тканей - существенный недостаток диатермии, ограничивающий возможности ее применения.



Хотя применение данного метода в практике в настоящее время исключено, его рассмотрение в данном пособии аргументировано простотой моделирования тепловых эффектов и обоснованием метода электрохирургии.

### 1.3. Электрохирургия.

Тепло, образующееся в тканях тела при прохождении через них высокочастотного тока (1,5-2 МГц), используется не только для терапевтических, но и для хирургических целей. Необходимое для электрохирургии более интенсивное образование тепла в области воздействия обеспечивается (в соответствии с формулой (5)) применением активного электрода с площадью поверхности в  $10^3$  -  $10^4$  раз меньшей, чем площадь поверхности второго (пассивного) электрода (т.н. моноактивная методика).

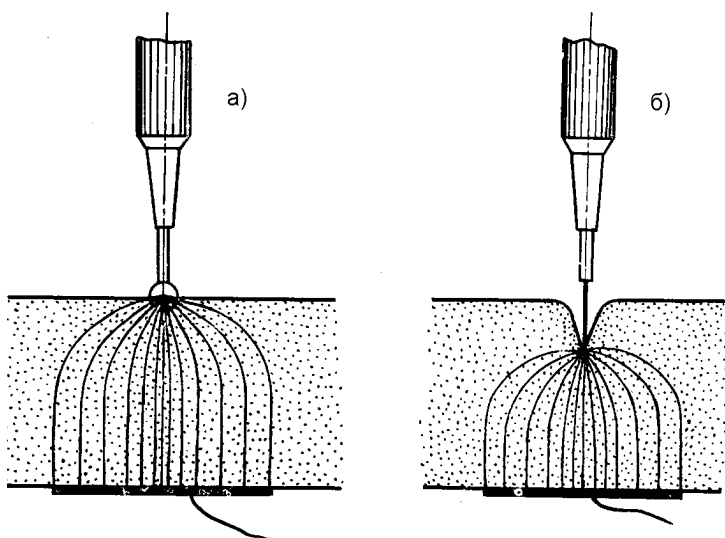


Рис.4. Схема монополярной электрохирургии:  
а) - коагуляция; б) - томия.

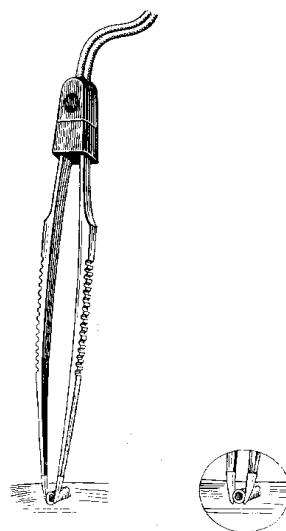


Рис.5. Биполярный пинцет

Различают два основных вида электрохирургии: сваривание ткани - электрокоагуляция и рассечение ткани - электротомия. При электрокоагуляции (рис.3а) активный электрод в форме шара или диска (диаметром несколько миллиметров) плотно прижимается к ткани, после чего на несколько секунд включается высокочастотный ток. Ткань под электродом нагревается до 60-80 °С, что приводит к необратимому свертыванию тканевых белков. Глубина действия электрокоагуляции не превышает половины диаметра активного электрода. При электротомии (рис.3б) активный электрод имеет форму тонкого лезвия, которым прикасаются к телу и после включения высокочастотного тока проводят без давления по поверхности рассекаемой ткани. Применяются также активные электроды в виде иглы или проволочного кольца. При электротомии из-за интенсивного нагрева ткани под электродом (до 100 - 120° С) ее клеточная и межклеточная

жидкости мгновенно (со взрывом) испаряются и разрывают ткань. Величина тока и скорость движения активного электрода определяют глубину разреза ( 1 - 5 мм) и степень коагуляции тканей.

В электрохирургии распространена также и биполярная методика, когда оба электрода являются активными (т.е. имеют малую площадь), - т.н. биполярный пинцет. Она особенно удобна при хирургии над выступом участков тканей .

Следует отметить, что при электрохирургии смачивается кровью активный электрод, что приводит к уменьшению силы тока. Поэтому необходимо высушивать операционную рану и периодически удалять с электрода коагуляционную пленку. Кроме того, возникающие искры имеют высокую (до 3000 °С ) температуру, что приводит к обугливанию тканей и возникновению неприятного запаха. Это требует наличия принудительной вентиляции.

## **2. Воздействие высокочастотным электромагнитным полем.**

### **2.1. *Высокочастотная индуктотермия.***

Специфика воздействия высокочастотного электромагнитного поля (ЭМП) на органы и ткани биологического объекта определяется соотношением между электрическими и магнитными компонентами.

**Высокочастотная индуктотермия** - метод электролечения, в основе воздействия которого преобладает высокочастотное магнитное поле, образующееся вокруг витков индуктора при прохождении по нему переменного тока высокой частоты (13,56 МГц) \* .

Распространяющееся в теле пациента переменное магнитное поле индуцирует (порождает) в соответствии с теорией Максвелла вихревые (замкнутые) токи, которые называются токами Фуко. На создаваемом этими токами тепловом эффекте и основан метод индуктотермии. В результате этого бесконтактного метода происходит прогрев тканей на глубину 6-8 см, приводящий к локальному повышению температуры на 1,5-2° С. Процедура имеет сугубо полевой бесконтактный характер. Эквивалентной электрической схемой индуктора при проведении процедуры является высокочастотный трансформатор, нагруженный на сопротивление равное активному сопротивлению тканей организма.

---

\* В физиотерапии находит также широкое применение ультравысокочастотная индуктотермия (частота 40,68 МГц).

Определим удельное количество выделяющейся теплоты. Расчет проводим на основе закона

Джоуля-Ленца (2) в виде  $Q = \frac{\varepsilon_i^2}{R} t$  (5), где  $\varepsilon_i$  - э.д.с. индук-

ции:  $\varepsilon_i = - \frac{d\Phi}{dt}$ ;  $\Phi = BS \cos \omega t$  - магнитный поток. Тогда

$\varepsilon_i = - BS \omega \sin \omega t$  (6). Учитывая, что максимальное значение э.д.с. индукции будет при  $\sin \omega t = 1$  и подставляя  $R = \rho l/S$  в

(5), получаем  $Q = \frac{B^2 S^2 \omega^2 t}{\rho l/S}$ . Так как  $\omega = 2\pi\nu$ ,  $q = \frac{Q}{l S t}$ , то

$$q = \frac{B^2 S^2 4 \pi^2 \nu^2}{\rho} \text{ или}$$

$$q \sim \frac{\nu^2 B^2}{\rho}. \quad (7)$$

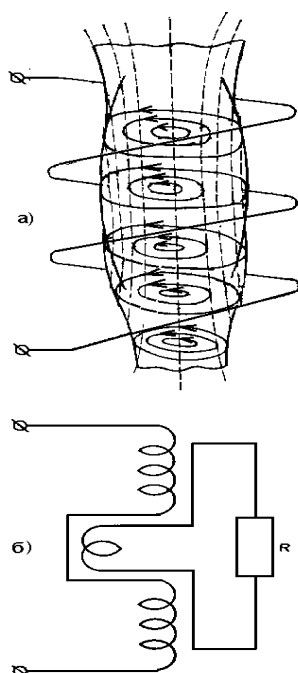


Рис.6. Схематическое изображение принципа индуктотермии: а) - ВЧ МП (пунктирные линии) и вихревые токи в тканях (сплошные линии); б) - эквивалентная схема индуктора с объектом

Таким образом при индуктотермии наибольшее количество теплоты образуется в проводниках - жидких средах организма: кровь, лимфа, а также в богатых ими тканях (мышцы, печень и др.), обладающих малым удельным сопротивлением. При этом кожа и подкожно-жировая клетчатка нагреваются гораздо меньше.

Под влиянием индуктотермии в тканях возникает локальное продолжительное повышение температуры:

усиливается кровообращение и лимфоток, повышается тканевый обмен, уменьшается нервно-мышечная возбудимость, активизируется деятельность ферментообразующих систем. Индуктотермия обладает обезболивающим, противовоспалительным действием.

## 2.2. Ультравысокочастотная (УВЧ) - терапия.

**Ультравысокочастотная (УВЧ-терапия)** - метод применения для лечебных целей электромагнитного поля ультравысокой частоты (ЭМП УВЧ) (40,68 МГц)\*, в котором электрическая составляющая преобладает над магнитной. Основной эффект действия - тепловой, но при малых интенсивностях наблюдается и осцилляторный.

ЭМП УВЧ к пациенту подается с помощью электродов различной величины, которые устанавливают на расстоянии 1-3 см от поверхности тела больного (суммарный зазор

\* Стандартной международной принята частота 27,12 МГц.

не более 6 см). Коэффициент поглощения энергии ЭМП УВЧ тканями не высок, и поэтому энергия проникает на всю глубину любой части тела.

В тканях организма под влиянием ЭМП УВЧ образуется два вида тока. В тканях, хорошо проводящих электрический ток (кровь, лимфа, моча и ткани, имеющие хорошее кровоснабжение), в ЭМП УВЧ заряженные частицы колеблются прямолинейно то в одну, то в другую сторону с частотой изменения полярности высокочастотного поля. За счет такого колебания в названных тканях возникает **ток проводимости**. Колебания частиц происходят в вязкой среде, поэтому теряется какое-то количество энергии, связанное с преодолением сопротивления этой среды и образованием тепла за счет **омических потерь**. В тканях, по своим свойствам, близким к диэлектрикам (нервная, соединительная, жировая, костная), образуются полярные молекулы (диполи), которые изменяют свою ориентацию в зависимости от частоты изменения напряженности высокочастотного поля. За счет вращения дипольных частиц в диэлектриках возникает **ток смещения**, а потери, связанные с преодолением сопротивления окружающей среды вращающимися частицами, называются **диэлектрическими потерями**.

Определим удельное количество теплоты, выделяющееся при УВЧ-терапии. Расчет основан на законе Джоуля-Ленца (2).

**Проводник**. В этом случае электроды не касаются тела. Поэтому выделяющееся в теле количество теплоты целесообразно выразить через напряженность электрического поля. После простых преобразований

$$Q = \frac{U^2}{R} t = \frac{E^2 l^2 S t}{\rho l}, \quad (8)$$

тогда

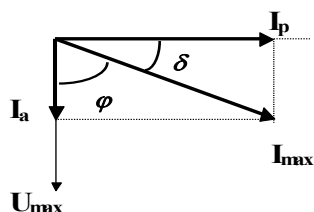
$$q = \frac{E^2}{\rho} \quad (9)$$

Таким образом, при УВЧ-терапии прогреваются проводники с малым удельным сопротивлением.

**Диэлектрик**: Расчет удельного количества теплоты достаточно сложный, поэтому запишем сразу конечную формулу:

$$q = \omega \varepsilon \varepsilon_0 E^2 \operatorname{tg} \delta, \quad (10)$$

где  $\delta$  - угол диэлектрических потерь - дополнительный до  $90^\circ$  к углу ( $\varphi$ ) между силой тока и напряжением в цепи переменного тока.



Представим вектор тока  $I$  двумя составляющими: реактивной  $I_r$  и активной  $I_a$ . Реактивная составляющая сдвинута по фазе относительно напряжения  $U$  на  $\frac{\pi}{2}$  и не вызывает диэлектрических потерь (на ней тепло не выделяется), активная составляющая направлена вдоль вектора напряжения и обуславливает диэлектрические потери (тепло выделяется). Под влиянием поля УВЧ на частоте до 40,68 МГц преобладает возникновение тока смещения. При этом энергия глубоко проникает в организм и выделяется в тканях, плохо проводящих электрический ток.

При воздействии ЭП УВЧ происходит ряд физико-химических изменений: усиление дисперсности белков крови; уменьшение рН-, и вязкости жидких сред. Под влиянием УВЧ-

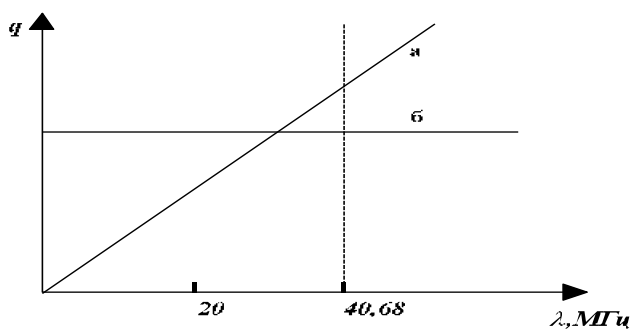


Рис.6. Зависимость удельного количества выделяющейся теплоты от частоты в диэлектриках (а) и проводниках (б) в ЭП УВЧ.

терапии в организме возникают существенные изменения в различных органах и системах целостного организма: усиливаются процессы возбуждения в коре головного мозга, изменяется возбудимость нервных рецепторов, ускоряется проведение возбуждения по нервному волокну, повышаются трофическая и регулирующие функции нервной системы. Активируются многочисленные

функции соединительной ткани. За счет увеличения проницаемости стенок кровеносных капилляров в очаге воспаления усиливается поступление различных иммунных тел и других защитных клеток системы. Существенно усиливается местное крово- и лимфообращение. ЭП УВЧ оказывает выраженное противовоспалительное, обезболивающее, спазмолитическое, стимулирующее защитные силы организма действие.

### 2.3. Импульсная УВЧ - терапия.

При импульсной УВЧ-терапии ЭП имеет импульсный характер. Генерация высокочастотных колебаний происходит в течение нескольких микросекунд, после чего следует пауза, в тысячу раз превышающая длительность самого импульса. Напряженность поля между электродами за время действия импульса достигает нескольких тысяч вольт на метр, что в 6-7 раз больше, чем при непрерывном режиме. Поскольку мощность колебаний пропорциональна квадрату напряженности поля, то аппараты для импульсной УВЧ-

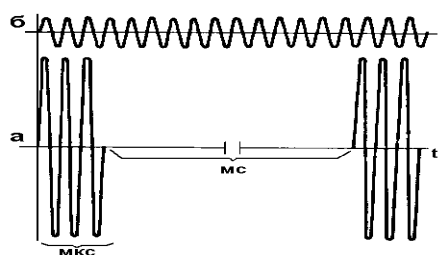


Рис.8. График колебаний ЭП УВЧ при непрерывном (а) и импульсном (б) режимах.

терапии имеют мощность в импульсе до 15000 Вт, что в 40 раз больше мощности, которая может создаваться аппаратами для непрерывной УВЧ-терапии. Однако, средняя за период мощность импульсных колебаний в тысячу раз меньше, чем мощность в импульсе и не превышает 15 Вт.

Специфика импульсной УВЧ-терапии определяется высокой напряженностью электрического поля в каждом импульсе и длительной паузой между импульсами. Поэтому значительно усиливается осцилляторный компонент действия и ослаблен тепловой, так как за время длительной паузы между импульсами образовавшееся локальное тепло уносится током крови. Т.о. при импульсной УВЧ-терапии проявляется в основном нетепловой эффект. Следует также отметить, что специфический эффект всегда присутствует при малых интенсивностях ВЧ ЭМП. Вместе с тем импульсная УВЧ-терапия является мощным ритмическим раздражителем различных органов и систем. Под влиянием импульсной УВЧ-терапии усиливаются тормозные процессы в высших отделах ЦНС, снижается повышенное артериальное давление, уменьшается проницаемость капиллярной стенки.

Импульсная УВЧ-терапия обеспечивает болеутоляющее, противовоспалительное, десенсибилизирующее, трофическое действие на фоне стимуляции тормозных процессов и регулирующей роли центральной нервной системы, не предъявляя при этом повышенных требований к деятельности сердца, сосудов, что очень важно при назначении ЭП УВЧ больным с заболеваниями сердечно-сосудистой системы и больным преклонного возраста.

### 3. Волновая терапия.

#### 3.1. Сантиметровая волновая (СМВ)-терапия.

**Микроволновая (СМВ-терапия)** - метод электролечения, при котором на ткани организма воздействуют ЭМИ сверхвысокой частоты (СВЧ) (порядка 2375 МГц) и небольшой мощности (60-70 Вт).

Специфика излучения и подвода энергии. В связи с очень высокой частотой, приближающейся к частотам электромагнитных колебаний оптического диапазона, свойства сантиметровых волн близки к свойствам инфракрасного излучения. Из-за больших потерь они не могут передаваться по проводам. Для их проведения используют коаксиальный кабель, в котором одним проводником является центральный провод, покрытый изоляционным материалом определенной толщины и свойств, а вторым - металлическая оплетка вокруг изоляции. Для подведения сантиметровых волн к телу используют не пластины или контуры, а излучатель с рефлектором, напоминающим лампу с отражателем. Излучатели концентрируют энергию в параллельные пучки, в результате чего обеспечивается локальное воздействие на отдельные участки тела. Процедура проводится при установке излучателя на расстоянии 3-5 см от поверхности тела.

Используются также керамические излучатели с диаметром 2,0 - 3,5 см. Эти излучатели представляют собой замкнутый с одной стороны возбуждаемый штырем круглый волновод, заполненный высокочастотной керамикой. Такое заполнение позволяет увеличить длину волны СВЧ-ЭМИ в волноводе и соответственно уменьшить его диаметр. Керамические излучатели применяются по контактной методике, т.е. при непосредственном соприкосновении с телом. Поскольку диэлектрическая проницаемость керамики близка к диэлектрической проницаемости кожи и мышечных тканей, то в месте контакта заметного отражения волны не происходит.

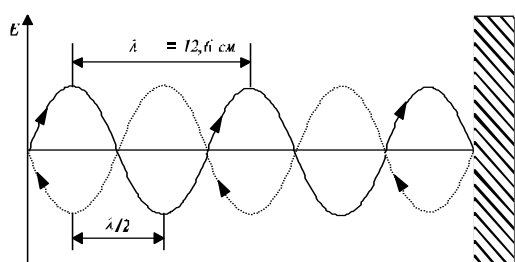


Рис.9. Возникновение стоячих волн при СМВ-терапии.

Волновые свойства . Часть СМВ-энергии отражается от кожных покровов и поверхностей раздела сред и тканей организма, при этом образуются стоячие волны внутри тела и создается опасность локального перегрева. Поскольку тепловые рецепторы находятся на поверхности тела, а кожа нагревается незначительно, следовательно, пациент не чувствует повышения температуры внутри орга-

низма. Поэтому специфика методики СМВ-терапии заключается в жестком контроле времени проведения процедуры, что обеспечивается встроенным в прибор таймером. СВЧ-ЭМИ проникает в ткани организма на глубину 3-4 см, при этом основное его количество поглощается тканями с большим содержанием воды (кровь, лимфа, мышцы). Под действи-

ем СМВ соотношение теплового и осцилляторного компонентов меняются в зависимости от интенсивности воздействия. Под влиянием СМВ в тканях возникают выраженные изменения: повышается температура подкожно-жирового слоя и близлежащих тканей на  $2-4^{\circ}\text{C}$ , усиливается крово- и лимфообращение за счет увеличения скорости кровотока, количества функционирующих капилляров и расширения мелких сосудов, ускоряются окислительно-восстановительные и репаративные процессы.

Применение СМВ-терапии вызывает выраженное местное болеутоляющее, противовоспалительное. Она с успехом применяется при острых воспалительных заболеваниях локализованных на глубине 3-4 см.

### 3.2. Дециметровая волновая (ДМВ) - терапия.

Дециметровая (ДМВ-терапия) - метод электролечения, при котором на ткани ор-

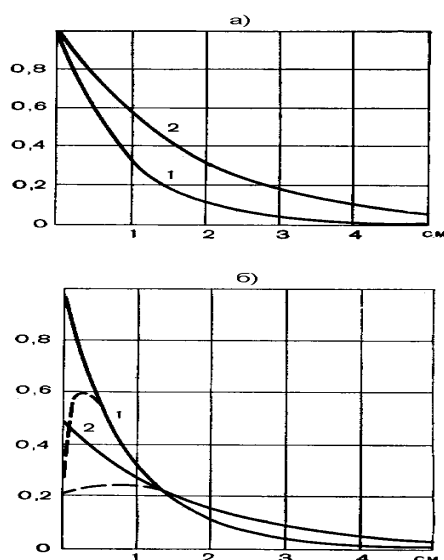


Рис.9. Распределение напряженности поля (а) и прироста температуры мышечной ткани при воздействии СМВ и ДМВ. Пунктиром показан прирост температуры с учетом теплообмена с окружающей средой. 1-  $\nu = 2375$  МГц; 2 - 460 МГц.

ганизма воздействуют электромагнитным полем сверх высокой частоты дециметрового диапазона 461,5МГц и небольшой мощности - до 60 Вт.

Сравнение СМВ и ДМВ- терапии. При релаксационных колебаниях дипольных молекул воды возникают диэлектрические потери с преобладанием преобразования энергии волн тепло. Вследствие разницы в величине релаксационных потерь глубины проникновения электромагнитных волн в ткани тела на частотах 2375 и 460 МГц существенно различаются. При частоте 460 МГц глубина проникновения в мышечные ткани достигает 9-11 см . Кроме того, различные ткани организма хорошо и равномерно поглощают энергию. Толщина кожи, подкожного жирового слоя и поверхности раздела сред организма не влияют на коэффициент отражения волн, поэтому в них не может возникать перегрев. Возможность сравнительно более глубокого воздействия при меньшем нагреве поверхно-

сти тканей является существенным преимуществом ДМВ-терапии по сравнению с СМВ - терапией. Под влиянием ДМВ в тканях организма возникают выраженные местные реакции: повышается местная температура на  $1-2^{\circ}\text{C}$ . Значительно усиливается микроциркуляция, повышаются ферментативные процессы и обмен веществ.



### **3.3. Крайне-высокочастотная (КВЧ)- терапия.**

Диапазон крайне-высоких частот от  $3 \cdot 10^{10}$  до  $3 \cdot 10^{11}$  Гц, что соответствует диапазону миллиметровых волн от 10 до 1 мм.

ЭМИ нетепловой мощности данного спектрального диапазона оказывает существенное воздействие на любые живые организмы: изменение ферментативной активности, темпов роста и гибели микроорганизмов, защита костно-мозгового кроветворения от воздействия радиации и химических препаратов. Действие ЭМИ носит не энергетический, а **информационный характер**, причем, первичный эффект реализуется на клеточном уровне и связан с биологическими структурами, общими для всех организмов. Обладающие значительным дипольным моментом элементы клеточных мембран (молекулы белков- ферментов) имеют частоты собственных механических колебаний, лежащие в диапазоне  $(0,5-5) \cdot 10^{10}$  Гц.

***Основные закономерности воздействия ЭМИ КВЧ сигналов следующие:***

1. *Острорезонансный характер* биологического действия;
2. *Эффект насыщения.* При фиксированном времени воздействия эффекты наблюдаются при достижении пороговой плотности мощности ( $10^{-1} - 10^3$  Вт/м<sup>2</sup>); ее дальнейшее увеличение не влияет на характер действия;
3. *Эффект запоминания* обусловлен длительностью воздействия (от десятков минут до нескольких часов);
4. *Зависимость от исходного состояния организма.* На текущее функционирование здорового организма однократное облучение КВЧ практически не влияет. Если же какая-либо из функций организма нарушена, воздействием когерентных КВЧ-излучений можно во многих случаях добиться ее восстановления.\*

---

\* Тепловым воздействием добиться эффектов, удовлетворяющих этим закономерностям, не удастся

### § 3.Электротехническая реализация ВЧ- аппаратуры

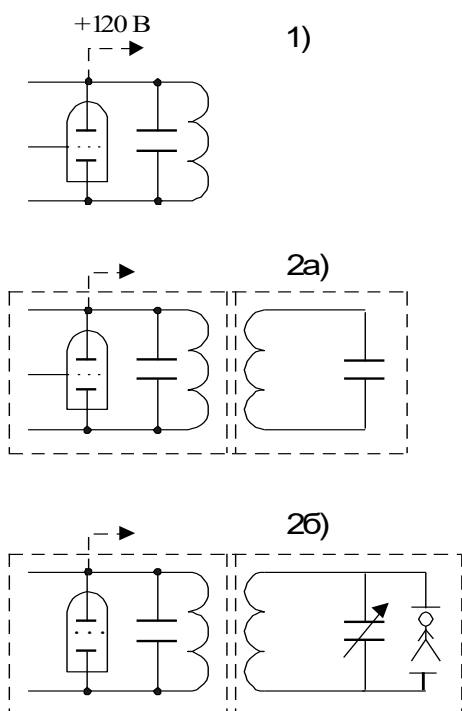


Рис.10.Технический (1) и терапевтический (2а) с дополнительным подстроечным конденсатором (2б) контура.

Электромагнитные колебания возникают в колебательном контуре, включающем в себя параллельно соединенные конденсатор (емкость  $C_1$ ) и катушку индуктивности ( $L_1$ ). Период колебания определяется по формуле Томсона:

$$T = 2\pi\sqrt{LC} \quad (11)$$

Для того, чтобы колебания были незатухающими, необходим источник внешней энергии (триодная лампа). Эта конструкция обеспечивает т.н. технический контур. Пациента можно было бы помещать между обкладками конденсатора  $C_1$ . Но при этом существует опасность поражения постоянным током ( $U \div 100-120$  В), необходимым для поддержания режима вынужденных колебаний. Чтобы избежать опасности поражения электрическим током, необходимо использовать электрическую развязку, реализуемую за счет терапевтического контура,

работоспособность которого обусловлена явлением электромагнитной индукции. Для более эффективной передачи энергии от технического к терапевтическому контурам, необходимо чтобы они были настроены в резонанс, т.е. их частоты должны совпадать. Емкость конденсатора определяется по формуле:

$$C = \frac{\epsilon \epsilon_0 S}{d} \quad (12)$$

где  $\epsilon_0$  - абсолютная диэлектрическая проницаемость вакуума;  $\epsilon$  - относительная диэлектрическая проницаемость среды;  $S$  - площадь пластин конденсатора,  $d$  - расстояние между ними. Поэтому при помещении между конденсаторными пластинами различных участков тела нарушается электроёмкость в терапевтическом контуре. Чтобы система работала в режиме резонанса в терапевтическом контуре необходимо наличие переменной емкости ( $C_{\text{п}}$ ). Практически при УВЧ - терапии настройка в резонанс осуществляется по максимуму свечения  $Ne$  - лампочки; но в некоторых случаях приборы изначально оборудованы системой регистрации настройки технического и терапевтического контуров в резонанс.

## Порядок выполнения лабораторной работы:

### *I. Доказательство резонансного характера передачи энергии:*

1. Включить прибор УВЧ - терапии.
2. Между обкладками конденсатора поместить диполь (антенну, соединенную с микроамперметром).
3. Вращая рукоятку переменного конденсатора добиться максимального отклонения стрелки прибора (проверить по уровню свечения He-Ne- лампочки).
4. Зафиксировать показания прибора в зависимости от угла поворота.

$\varphi^0$	
I, мкА	

5. Построить график зависимости силы тока от угла поворота.

### *II. Доказательство того, что при воздействии ЭП УВЧ на частоте 40,68 МГц больше прогреваются диэлектрики.*

1. Между обкладками настроенного в резонанс терапевтического контура поместить кюветы с растворами проводника (NaCl) и диэлектрика (касторовое масло) с помещенными вовнутрь термометрами.
2. Настроить терапевтический контур в резонанс.
3. Через каждые 2 минуты регистрировать показания обоих термометров.

t, мин.	2	4	6	8	10	14	16	18	20
$t_1^0 \text{ C}$									
$t_2^0 \text{ C}$									

4. Построить график зависимости  $t_1^0 \text{ C}$  и  $t_2^0 \text{ C}$  от времени.

## Контрольные вопросы

1. Специфика ВЧ-воздействия: тепловые и нетепловые эффекты.
2. Принципы генерирования высокочастотных токов и полей.
3. Воздействие на организм за счет тепловых эффектов:
  - а) диатермия;
  - б) электрохирургия;
  - в) индуктотермия;
  - г) УВЧ-терапия;
  - д) ДМВ и СМВ - терапия;
4. Воздействие на организм за счет нетепловых эффектов.
  - а) дарсонвализация; ультратонотерапия;
  - б) импульсная УВЧ - терапия;
  - в) КВЧ - терапия.

## Дополнительные вопросы

1. Местная дарсонвализация проводится по одноэлектродной методике. Как тогда замыкается электрическая цепь? Что играет роль второго электрода?
2. Чем отличается механизм теплового эффекта, сопровождающего ультразвуковое воздействие на организм, от физической сущности тепловых эффектов при высокочастотной электротерапии?
3. Каковы основные отличия в механизмах теплового нагрева живых тканей с помощью грелок, инфракрасного излучения и высокочастотной электротерапии?
4. Укажите основные источники опасностей в электрохирургии.
5. Почему при УВЧ-терапии у больного должны быть удалены металлические предметы (кольца, шпильки, иголки и т.п.), находящиеся в области воздействия?
6. Каковы отличия первичных механизмов воздействия при УВЧ-терапии в непрерывном режиме и импульсной УВЧ-терапии? Как они могут быть объяснены?
7. При местной дарсонвализации на пациента воздействуют напряжением порядка 30 кВ. Почему при этом не может возникать поражения пациента электрическим током?
8. Сравните возможность и область применения электро-, ультразвуковой, крио- и лазерной хирургии.
9. Требование на дозирование воздействия при СМВ-терапии более жесткие, чем при УВЧ-терапии. Почему?

## Литература:

1. А.Р. Ливенсон "Электромедицинская аппаратура"., М., Медицина, 1981.
2. В.Г. Ясногорский "Электротерапия"., М., Медицина, 1987.
3. Справочник по физиотерапии для врача лечебно-профилактического учреждения., МО СССР, М., Военное издательство., 1987.
4. Е.И. Пасынков. "Общая физиотерапия"., М., Медицина., 1969.
5. А.П. Сперанский. "Учебное пособие по физиотерапии"., М., Медицина, 1975.
6. И.Г. Шемитило, М.Г. Воробьев., "Современные методы электро и светолечения"., М., Медицина., 1980.
7. "Физиотерапия"., уч-мед. разработка ИМГМИ им. И.М. Сеченова., М., 1984.
8. В.С. Улащик. "Новые методы и методики физической терапии"., Минск, "Беларусь"., 1987.
9. А.Н. Ремизов., "Медицинская и биологическая физика"., М., Высшая школа., 1996
10. Ливенцев. "Курс физики" (т.1 и 2), М., 1978.
11. Ф.К. Горский, Н.М. Сакевич. "Физический практикум с элементами электроники"., Минск., Высшая школа., 1980.
12. И.А. Ессаулова и др. "Руководство к лабораторным работам по медицинской и биологической физике"., М., Высшая школа, 1987.
13. Б.Т. Агапов и др. "Лабораторный практикум по физике"., М., Высшая школа, 1982.
14. Г.Н. Пономаренко. "Электромагнитотерапия и светолечение"., С.-Петербург., Мир и семья-95, 1995.

## СОДЕРЖАНИЕ

<b>Введение .....</b>	<b>3</b>
<b>§1.Электрические свойства биологических тканей и их зависи- мость от частоты электромагнитного излучения .....</b>	<b>4</b>
<b>§2.Лечебные методы ВЧ-воздействия на органы и ткани .....</b>	<b>6</b>
<b>1. Токовое воздействие .....</b>	<b>6</b>
1.1. Дарсонвализация и ультратонотерапия.....	6
1.2. Диатермия. ....	7
1.3. Электрохирургия. ....	9
<b>2. Воздействие высокочастотным электромагнитным полем.....</b>	<b>10</b>
2.1. Высокочастотная индуктотермия. ....	10
2.2. Ультравысокочастотная (УВЧ) - терапия. ....	11
2.3. Импульсная УВЧ - терапия. ....	13
<b>3. Волновая терапия.....</b>	<b>14</b>
3.1. Сантиметровая волновая (СМВ)-терапия . ....	14
3.2. Дециметровая волновая (ДМВ) - терапия. ....	16
3.3. Крайне-высокочастотная (КВЧ)- терапия.....	17
<b>§ 3.Электротехническая реализация ВЧ- аппаратуры .....</b>	<b>18</b>
<b>Порядок выполнения лабораторной работы: .....</b>	<b>19</b>
<b>Контрольные вопросы.....</b>	<b>20</b>
<b>Дополнительные вопросы .....</b>	<b>20</b>
<b>Литература:.....</b>	<b>21</b>

Учебное издание

Морозов Владимир Петрович

## ФИЗИЧЕСКИЕ ПРИНЦИПЫ ВЫСОКОЧАСТОТНОЙ ЭЛЕКТРОТЕРАПИИ

Учебно-методическое пособие  
по медицинской и биологической физике  
для студентов медицинских ВУЗов

Ответственный за выпуск профессор С.Д. Денисов

Подписано в печать . Формат 60x84/16. Бумага писчая.

Уч.-изд. л. Уч. печ. л. Заказ Тираж экз.

---

Отпечатано в МГМИ г. Минск, ул. Ленинградская, 6

