

Физические процессы в тканях при воздействии током и электромагнитными полями.

Под действием электромагнитных полей в тканях возникают два вида токов: 1) токи смещения, и 2) токи проводимости.

Токи смещения связаны с поляризацией молекул и их переориентацией, т.е. с вызванной электрическим полем вращательной переориентацией диполей.

Токи проводимости возникают за счет движения в электрическом поле зарядов – в электролитах носителями тока являются ионы.

При низких частотах преобладают токи проводимости. При частотах приблизительно более 500 кГц смещение ионов становится небольшим, соизмеримым с их смещением в результате молекулярно-теплового движения. При более высоких частотах преобладают токи смещения.

Для того, чтобы разобраться в механизме действия переменных электромагнитных полей полезно вернуться к частотной зависимости импеданса тканей. Возникновение областей α -, β - и γ -дисперсии импеданса обусловлено частотной зависимостью диэлектрической проницаемости тканей (рис. 1).

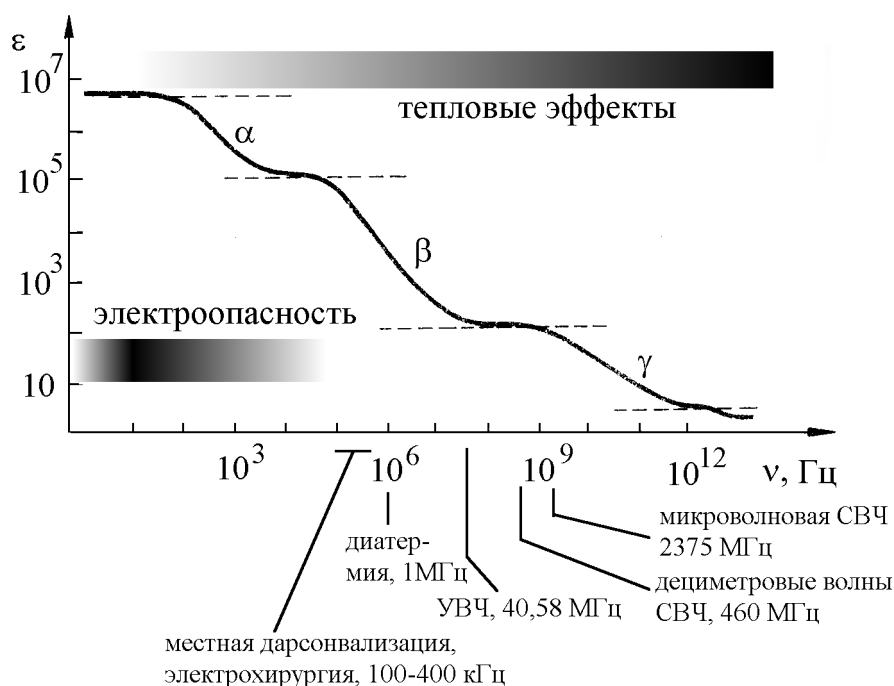


Рисунок 1. Частотная зависимость диэлектрической проницаемости тканей.

Область γ -дисперсии обусловлена переориентацией в электрическом поле небольших диполей воды. При возрастании частоты увеличивается скорость их переориентации, соответственно возрастают силы трения. При частотах выше 10^9 Гц трение становится столь большим, что диполи воды уже не успевают следовать за полем и при частотах выше 10^{12} Гц диполи воды совсем перестают вращаться.

В области β -дисперсии аналогичные процессы наблюдаются для более крупных диполей, например, молекул белков, полярных головок молекул фосфолипидов и др. молекул. На рисунке 2 показаны для сравнения диполи молекул воды и фосфолипида лецитина.

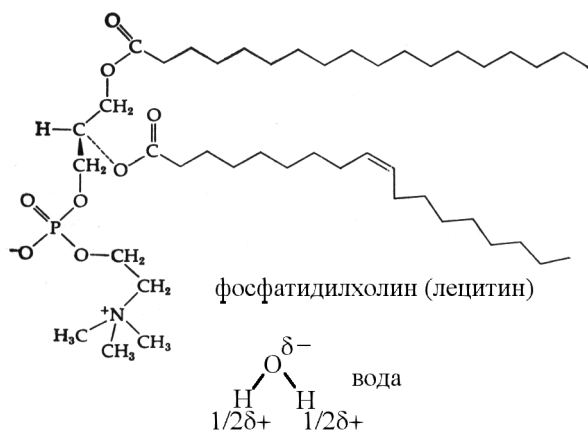


Рисунок 2. Электрические диполи молекул лецитина и воды.

В молекулах воды электронные облака смещены от атомов водорода в сторону кислорода, в результате у атома кислорода возникает избыточный δ^- отрицательный заряд, который меньше заряда электрона. Соответственно у атомов водорода появляется такой же по величине избыточный положительный заряд. В молекулах лецитина при нейтральных рН в ионизированном состоянии находятся остатки фосфорной кислоты и холина. На этих группах возникают отрицательный и положительный заряды, равные заряду электрона. Таким образом, полярная головка молекулы лецитина представляет собой электрический диполь, дипольный момент ($p=q\ell$) которого значительно больше, чем у воды из-за больших величин зарядов (q) и расстояний между ними (ℓ). Естественно, что более громоздкому диполью головки лецитина вращаться труднее, чем маленькому диполью воды. Такие громоздкие диполи способны переориентироваться вслед за полем, если частота поля меньше 10^7 - 10^8 Гц. Ориентационной поляризацией крупных диполей молекул белков и липидов, входящих в состав биологических мембран, обусловлено возникновение области β -дисперсии.

Область α -дисперсии обусловлена поляризацией еще более крупных структур, к которым могут быть отнесены целые клетки или даже органы. Это наиболее медленные из всех рассмотренных процессов. В результате поляризации клеток на них возникает разность электрических потенциалов, которая при достижении пороговых значений может привести к переходу нервных и мышечных клеток из состояния покоя в состояние возбуждения. Физиологически это проявляется в виде ощутимых или неотпускающих токов. На рисунке 3 представлены зависимости порогов ощутимого и неотпускающего токов от частоты прилагаемого электрического поля.

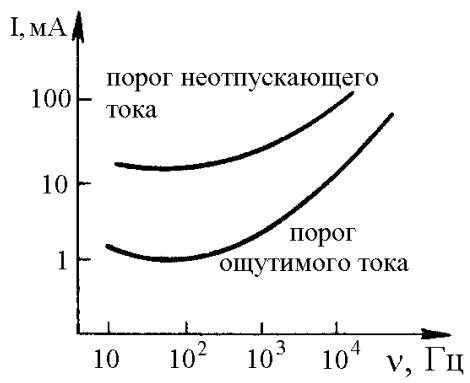


Рисунок 3.

Ощутимые токи используют для проверки годности электрических батареек для карманных фонариков напряжением 1,5-4,5 В. Если при приложении клемм батарейки к языку возникает характерное пощипывание, то это означает, что возникает ток, превышающий порог ощутимого тока. Электрический ток вызывает раздражение нервных клеток. Как правило, это означает, что батарейка пригодна к использованию. Порогом ощутимого тока называют наименьшую силу тока, раздражающее действие которого ощущает человек. Эта величина зависит от места и площади контакта тела с подведенным напряжением, частоты тока. Для участка предплечье – кисть у мужчин среднее значение порога ощутимого тока при частоте 50 Гц составляет около 1 мА.

При увеличении силы тока можно вызвать такое сгибание сустава, при котором человек не сможет самостоятельно разжать руку и освободиться от проводника – источника напряжения. Минимальную силу этого тока называют порогом неотпускающего тока. Токи меньшей силы являются отпускающими.

Наиболее опасны токи, проходящие через область сердца, т.к. они могут вызвать фибрилляцию сердечных мышц желудочков. Сердце перестает качать кровь, если не произвести дефибрилляцию в течение примерно 10 минут, начинаются необратимые повреждения тканей головного мозга, что в итоге и является причиной гибели человека.

Чем выше частота тока, тем труднее вызвать раздражение клеток и вызвать фибрилляцию. Электроопасными можно считать частоты ниже 10^5 Гц (рис. 2). При более высоких частотах (за пределами α -дисперсии) токи не вызывают раздражения и являются поэтому не опасными. В области β - и γ -дисперсии основным является тепловое воздействие. На рис. 2 видно, что все применяемые в медицине терапевтические и электрохирургические методы основаны на применении электробезопасных высокочастотных токов, вызывающих тепловые эффекты.

Важным параметром является глубина проникновения электромагнитного излучения в ткани δ . Величина δ численно равна глубине проникновения, при которой поле ослабевает в e раз. Особенно существенно учитывать этот параметр при использовании высокочастотных полей.

$$\delta = \sqrt{\frac{1}{\pi \mu \mu_0 g \nu}},$$

где g – средняя удельная проводимость биологических тканей ($g = 0,6 \text{ Ом}^{-1}\text{м}^{-1}$), $\mu_0 = 1,256 \cdot 10^{-6} \text{ В с А}^{-1} \text{ м}^{-1}$, $\mu = 1$ (магнитная проницаемость биологических тканей). Эта формула показывает, что глубина проникновения понижается с увеличением частоты ν . Так, для УВЧ-излучения $\delta=0,102$ м, для дециметровых СВЧ-волн – $0,031$ м, для микроволновой СВЧ – $0,013$ м. Приведенные величины являются приблизительными, т.к. при их расчете не учитывается диэлектрическая гетерогенность биологических тканей.