

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЧАСТОТ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ДЛЯ СТИМУЛЯЦИИ ИММУНОКОМПЕТЕНТНЫХ КЛЕТОК ЖИВОТНЫХ

Ляшенко Г. А., Полянова Н. В., Кравченко П. О., Черепнев И. А.

*Харківський національний технічний університет сільського господарства імені Петра Василенка*

*Рассмотрено стимулирующее воздействие электромагнитных излучений на иммунокомпетентные клетки биологических объектов.*

**Постановка задачи, анализ последних достижений.** Изучение особенностей иммунного ответа на внедрение антигена в организм показало, что положительный исход заболевания напрямую зависит от достаточной скорости воспроизводства Т-лимфоцитов и антител. Кроме того, как показали исследования, необходимо увеличить мембранную проницаемость для активации киллерного действия Т<sub>E</sub>-лимфоцитов-эффекторов и макрофагов по отношению к зараженным клеткам [1]. Обычно для этой цели использовался хлористый кальций, однако в последнее время в ряде работ [2] показано, что излучение миллиметровых волн (ЭМИ) способно эффективно влиять на проницаемость клеточной мембраны, а также инициировать синтез АТФ (аденинотрифосфат – универсальный аккумулятор и распределитель энергии в живых системах) в клетках. Воздействуя на расположенное в коже депо иммунных клеток (Т-лимфоцитов), мм-волны усиливают синтез иммунокомпетентных веществ [2].

**Целью статьи** является определение частот ЭМИ для активации киллерного действия Т<sub>E</sub>-лимфоцитов-эффекторов и макрофагов по отношению к зараженным клеткам.

**Основные материалы исследования.** Оценка влияния электромагнитных КВЧ-излучений на акустические колебания клетки приводит к необходимости определения собственных частот акустических колебаний. Для расчета акустических колебаний можно воспользоваться следующими соображениями. Имеется система, состоящая из двух частей протоплазмы и мембраны [2] (рис. 1).

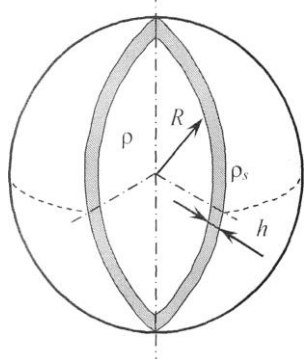


Рисунок 1 – Сферическая модель биоклетки

Сделаем следующие допущения:

- протоплазма внутри клетки однородна и несжимаема ( $\rho = const$ );

- не учитывается взаимодействие мембраны с межклеточной жидкостью, т.е. отсутствуют потери энергии на излучение;

- протоплазма является идеальной жидкостью, то есть вязкостью протоплазмы можно пренебречь, при этом отсутствуют потери энергии в системе, что означает перераспределение энергии циклически от мембраны к протоплазме и обратно.

Акустические импедансы мембраны и протоплазмы [3] в случае, если они чисто мнимые, являются мерой циклического обмена энергии. Если энергия перекачивается без потерь, то импедансы протоплазмы и мембраны должны быть равны. Акустический импеданс вещества внутри сферы равен отношению давления внутри сферы к радиальной скорости. Этот импеданс у поверхности мембраны должен быть равен импедансу мембраны. Учитывая зависимость импедансов от частоты, можно найти частоты собственных колебаний сферической модели.

По материалам [3] биологическая клетка животного обладает характеристиками, представленными в таблице 1.

Таблица 1 – Параметры биологической клетки

Радиус мембраны $R$ , м	$5 \cdot 10^{-6} - 10^{-5}$
Толщина мембраны $h$ , м	$10^{-8}$
Плотность протоплазмы $\rho$ , кг/м <sup>3</sup>	$10^3$
Плотность мембраны $\rho_s$ , кг/м <sup>3</sup>	$10^4 - 3 \cdot 10^5$
Натяжение мембраны $T$ , н/м	0,45
Модуль упругости при двумерном растяжении в плоскости мембраны $E$ , Па	$3 \cdot 10^7$
Модуль поперечной упругости мембраны $E_n$ , Па	$10^4 - 10^9$
Скорость распространения колебаний в протоплазме $c_{зв}$ , м/с	1450

Исследованию акустических колебаний биологической клетки посвящены работы [4, 5].

Колебания делятся на продольные (толщина мембраны остается неизменной в процессе колебаний) и поперечные (толщина мембраны изменяется). С другой стороны, возможны симметричные и несимметричные колебания. В первом случае колебания сферически симметричны с потенциалом скоростей, а во втором – нет. При этом восстанавливающая сила мембраны для высших типов колебаний создается изменением отношения между давлением и натяжением, вызванными изменением кривизны мембраны.

В случае несжимаемой жидкости сферические симметричные колебания невозможны, так как радиальная скорость будет равняться нулю, а импеданс бесконечности. Импеданс мембраны будет стремиться к бесконечности, если частота будет стремиться к нулю.

В случае сферически несимметричных колебаний восстанавливающая сила мембраны создается изменением отношения между давлением и натяжением, вызванным изменением кривизны мембраны. При этом нас будут интересовать только поперечные колебания, так как несмотря на то, что объем клетки не меняется, изменяется толщина мембраны, что может способствовать изменению транспорта ионов через мембрану [2].

Согласно [4, 5] акустический импеданс мембраны для несимметричных колебаний равен

$$Z_m = -i \frac{1}{4} \omega \rho_m h + \frac{i}{\omega} \left( (n-1)(n+2) \frac{T}{R^2} + \frac{E_n}{h} \right), \quad (1)$$

где  $n$  – номер гармоники.

Окончательное соотношение для определения частот колебаний будет иметь вид [5]

$$\omega^2 = \frac{n}{\rho R + n \rho_m h} \left[ (n-1)(n+2) \frac{T}{R^2} + \frac{E_n}{h} \right]. \quad (2)$$

Соотношение (2) будет исходным для численных расчетов частот собственных акустических колебаний иммунокомпетентных клеток.

Численные определения несимметричных поперечных колебаний иммунокомпетентных клеток выполним для лимфоцитов и тучных клеток.

Для выполнения расчетов собственных частот колебаний иммунокомпетентных клеток воспользуемся данными [3]. Радиус лимфоцита примем равным  $R = 5 \cdot 10^{-6}$  м, а для тучной клетки  $R = 10^{-5}$ . Остальные данные берутся из таблицы 1.

При  $n = 1$  в выражении (2) частота обращается в нуль. Физически это означает, что при  $n = 1$  в мембране не возникает восстанавливающей силы потому, что при таком смещении она сдвигается в сторону как единое целое [4]. Расчеты акустических частот для иммунокомпетентных клеток произведем для  $n = 2, 3, 4, 5$ . Данные расчетов приведены в таблице 2.

Таблица 2 – Частоты несимметричных поперечных колебаний клеток для несжимаемого вещества протоплазмы для  $\rho_m = 10^5$

$f, \text{Гц}$				
Виды клеток	$n=2$	$n=3$	$n=4$	$n=5$
тучная клетка	$2,22 \cdot 10^6$	$2,04 \cdot 10^6$	$2,23 \cdot 10^6$	$2,38 \cdot 10^6$
лимфоцит	$1,79 \cdot 10^6$	$2,53 \cdot 10^6$	$2,81 \cdot 10^6$	$3,08 \cdot 10^6$

Расчеты показывают, что с увеличением плотности мембраны  $\rho_m$  частота колебаний мембраны  $f$  увеличивается (рис. 2).

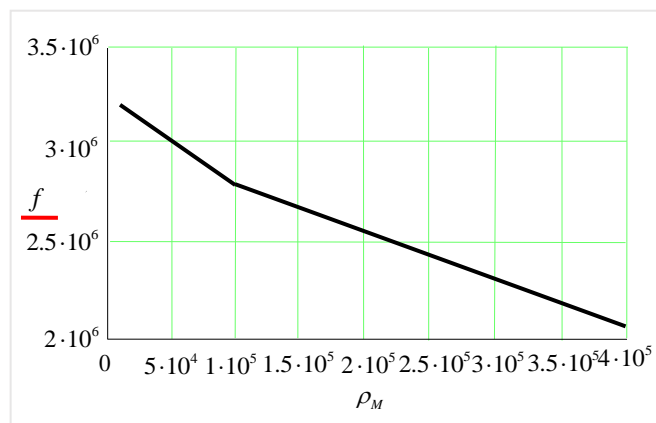


Рисунок 2 – Зависимость частоты гармоники  $n = 2$  лимфоцита от значения  $\rho_m$

Вид несимметричных поперечных колебаний клетки показан на рис. 3.

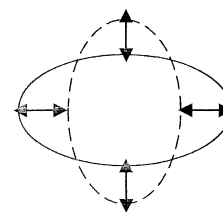


Рисунок 3 – Вид поперечных несимметричных колебаний ( $n = 2$ )

Как было замечено выше, если колеблющаяся величина зависит от пространства, то речь идет о пространственном резонансе, т.е. о совпадении длин волн акустических колебаний и вынуждающей силы (электромагнитного излучения  $\lambda_{ак} = \lambda_{эм}$ ). При этом частота электромагнитных колебаний определяется из соотношения

$$F = \frac{c_{эм}}{\lambda_{эм} \sqrt{\epsilon}},$$

где  $\epsilon$  – относительная диэлектрическая проницаемость среды;

$c_{эм}$  – скорость распространения электромагнитных волн в свободном пространстве.

Исходя из этого, возможно определить частоты электромагнитных колебаний, воздействие которых может вызвать акустический резонанс. Графические зависимости  $F$  от  $\rho_m$  для тучной клетки и лимфоцита приведены на рис. 4 и 5.

В таблице 1 приведены данные модуля поперечной упругости мембраны  $E$  в достаточно широком диапазоне изменения значений (от  $10^5$  до  $10^9$ ). График зависимости частоты  $f$  акустического резонанса от  $E$  приведен на рис. 6.

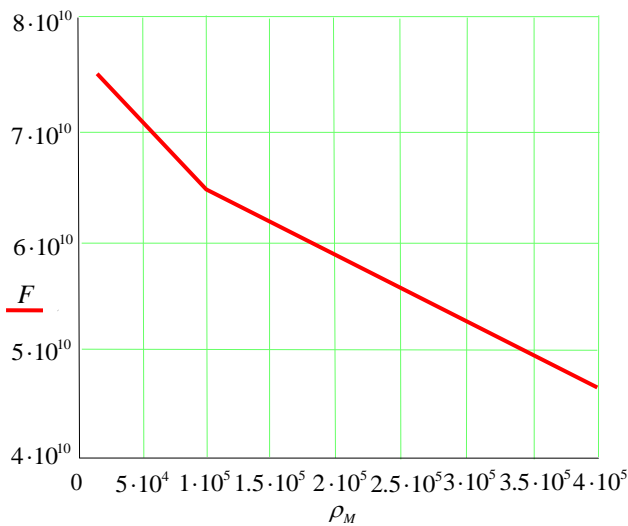


Рисунок 4 – Зависимость  $F$  от  $\rho_M$  для лимфоцита ( $n = 2$ )

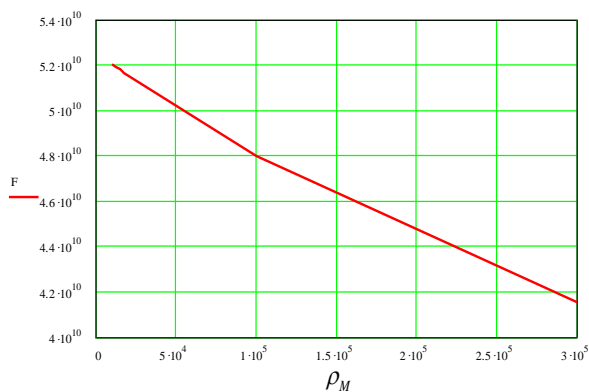


Рисунок 5 – Зависимость  $F$  от  $\rho_M$  для тучной клетки ( $n = 2$ )

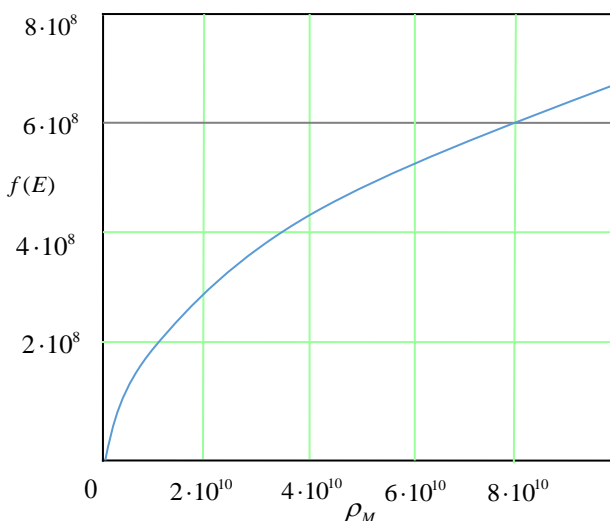


Рисунок 6 – Зависимость акустического резонанса от  $E$

**Выводы.** Предполагаемый эффект стимуляции ионного транспорта иммунокомпетентных клеток зависит от частот акустического резонанса клеток, при этом с ростом номера гармоники частоты резонанса растут.

Частоты электромагнитных излучений, вызывающих акустический резонанс, лежат в КВЧ-диапазоне миллиметровых и субмиллиметровых волн. Низшие частоты лежат в диапазоне 41,53 ГГц для тучной клетки до 51,40 ГГц для лимфоцита.

При определении резонансных частот большое значение имеет значение модуля поперечной упругости мембраны  $E$ . Рост показателя  $E$  приводит к существенному росту частоты акустического резонанса клетки.

Как следует из [1, 2], учет вязкости протоплазмы показывает, что она слабо влияет на частоту колебаний клетки, но влияет на время затухания.

#### Список использованных источников

1. Ярилин А. А. Основы иммунологии. Учебник / А. А. Ярилин // М.: Медицина, 1999. – 608 с.
2. Ляшенко Г. А. Результаты применения КВЧ-акупунктуры на биологически активные точки сельскохозяйственных животных в целях повышения их иммунитета // Г. А. Ляшенко, А. В. Шерстюк, И. И. Гордийчук. Вісник ХНТУСГ «Проблеми енергозабезпечення та енергозбереження в АПК України». – 2013. – Вип. 141. – С. 95 – 96.
3. Шеин А. Г. Поперечные акустические колебания клетки и влияние на нее электромагнитных волн низкой интенсивности / А. Г. Шеин, А. В. Харланов // Биомедицинские технологии и радиоэлектроника, 2006. – № 4. – С. 10 – 15.
4. Бецкий О. В. Миллиметровые волны в биологии и медицине / О. В. Бецкий, Т. И. Котровская, Н. Н. Лебедева // Материалы III Всероссийской конференции «Радиолокация и радиосвязь». – ИРЭ РАН, 26 – 30.10.2009. – С. 146 – 150.
5. Шеин А. Г. Расчет акустических колебаний клетки / А. Г. Шеин, А. В. Харланов, Р. Г. Никулин // Биомедицинские технологии и радиоэлектроника. – 2005, № 3. – С. 18 – 25.

#### Анотація

#### ВИЗНАЧЕННЯ ЧАСТОТ ЕЛЕКТРОМАГНІТНОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ ДЛЯ СТИМУЛЯЦІЇ ІМУНОКОМПЕТЕНТНИХ КЛІТИН ТВАРИН

Ляшенко Г. А., Полянова Н. В.,  
Кравченко П. О., Черепньов І. А.,

*Розглянуто вплив електромагнітних випромінювань на заражені клітини.*

#### Abstract

#### DETERMINATION OF FREQUENCIES OF ELECTROMAGNETIC RADIATION FOR STIMULATION OF IMMUNOCOMPETENT CELLS OF ANIMALS

G. Lyashenko, N. Polyanova, P. Kravchenko,  
I. Cherepnyov

*The effect of electromagnetic radiation on infected cells is considered.*