УДК 576:532.59

ИССЛЕДОВАНИЯ ПОВЕРХНОСТНЫХ СВОЙСТВ ЛИПИДНЫХ МОНОСЛОЕВ – МОДЕЛЕЙ БИОЛОГИЧЕСКИХ МЕМБРАН

С. В. Титов [1], В. С. Малинин [1], А. С. Титов [2], К. Д. Казаринов [1]

[1] Фрязинский филиал Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН, 141120, Московская область, Фрязино, пл. академика Введенского, 1

[2] Московский физико-технический инстиитут (ГУ), 141701, Московская область, г. Долгопрудный, Институтский пер., 9

Статья поступила в редакцию 9 октября 2018 г.

Аннотация. В данной статье развивается метод изучения поверхностных свойств липидных монослоев для исследования биологических эффектов микроволнового излучения. Решение уравнения Навье-Стокса, описывающего распространения поверхностных волн в жидкости применительно к липидным монослоям, позволило выразить поверхностное натяжение и вязкость монослоя, как функцию от частоты, волнового вектора и коэффициента затухания поверхностной волны. Представлен анализ влияние липидных монослоев на распространение поверхностных волн. Установлено, что наличие на поверхности жидкости липидной пленки меняет длину капиллярных волн и величину их коэффициента затухания при заданной частоте возбуждения. Использование переменного электрического поля для генерации поверхностных волн в комбинации с измерениями, проводимыми оптическим способом составляет одно из преимуществ развиваемого метода, делая основанную на данной методике эксперементальную технологию, полностью бесконтактной. Полученные результаты могут служить исходными данными для последующих экспериментов по применению электрострикционной генерации капиллярных волн в изучении поверхностных свойств липидных монослоев в условиях микроволнового облучения.

Ключевые слова: биологические эффекты микроволнового излучения, генерация поверхностных волн, поверхностно-активные вещества, липидные монослои, модели биологических мембран, длина волны и затухание поверхностных волн, уравнение Навье-Стокса.

Abstract. A method of investigation of the surface properties of lipid monolayers for the study of microwave biological effects is developed. The solution of the Navier-Stokes equation, describing the propagation of surface waves of a liquid as applied to lipid monolayers, permits the determination of the surface tension and viscosity of a monolayer as a function of the excitation frequency, the wave vector and the attenuation coefficient of the surface wave. The analysis of the effect of lipid monolayers on the propagation of surface waves is presented. It is shown that the presence of a lipid film on the surface of a liquid changes the wavelength of capillary waves and the attenuation coefficient for a fixed excitation frequency. One advantage of the method is that an ac electric field is used to generate surface waves which when combined with optical measurement renders this technique absolutely contact free. The results so obtained can serve as a basis for subsequent experiments applying electrostriction generation of capillary waves to the study of the surface properties of lipid monolayers as affected by microwave radiation.

Key words: biological effects of microwave radiation, generation of surface waves, surfactants, lipid monolayers, models of biological membranes, wavelength and attenuation of surface waves, Navier-Stokes equation.

1. Введение

Успехи мембранологии последних десятилетий стимулировали интенсивное изучение действия физико-химических факторов на мембранную систему клетки. В результате этих исследований, было показано, что именно мембранная система определяет в основном реакцию живой клетки на внешнее воздействие, в том числе и на микроволновое излучение [1-3]. Модельные мембранные системы (бимолекулярные модельные системы, липосомы и липидные монослои) позволяют изучать изменение как физиологических, так и структурных свойств биологических мембран под действием микроволнового излучения и трактовать механизм этого воздействия на клетки млекопитающих, оперируя более простыми моделями.

Данная работа посвящена развитию метода исследования монослоев липидов – моделей биологических мембран с целью изучения биологического действия микроволн и является продолжением наших исследований по теме биологической чувствительности микроволнового излучения [1]. В частности представлены результаты исследования влияния микроволн на коэффициенты вязкости и поверхностного натяжения липидного монослоя, что позволяет оценить действие излучения на многие мембранные процессы (ионного транспорта через мембрану, образование мембранного потенциала, транспорта электронов в дыхательной цепи митохондрий, взаимодействие рецепторов со специфическими лигандами и т.д.).

Изучение свойств тонких пленок поверхностно-активных веществ (ПАВ) на границе жидкость-воздух актуально для понимания целого ряда процессов в области физической химии, коллоидной химии, гидродинамики, биологии и т.д. Особое место в этом ряду занимает изучение липидных монослоев как моделей биологических мембран, а также легочных сурфактантов.

Метод липидных монослоев дает возможность определять как энергетические и механические параметры монослоя так и площадь единичных молекул, выстилающих монослой, что важно для понимания структуры и функции липидных бислоев в биологических объектах. Знание поверхностных свойств легочных сурфактантов необходимо и для фундаментальных исследований и для диагностики нарушений сурфактантной системы человека. Основные параметры, определяющие поверхностные свойства поверхностно-активных пленок, - это коэффициент поверхностного натяжения и поверхностная сжимаемость (или вязкость). В настоящее время известны несколько способов измерения этих параметров.

Для измерения поверхностного натяжения широко используется ряд методов менисков: метод капиллярного поднятия, висящей капли, пластинки Вильгельми, максимального усилия отрыва, кольца дю Нуи, объема падающих капель, максимального давления в пузырьке [4,5]. Эти методы дают неплохие результаты при измерении натяжения чистых поверхностей при условии соблюдения чистоты поверхностей, контактирующих с мениском. Однако в случае наличия на поверхности ПАВ их применение затруднено необходимостью учитывать значение краевого угла смачивания, а также возможностью налипания пленок на измерительные поверхности, что в свою очередь неконтролируемо изменяет угол смачивания.

Методы, основанные на регистрации волн на поверхности жидкости лишены многих недостатков методов менисков и в то же время позволяют измерять не только поверхностное натяжение, но и поверхностную вязкость монослоев. Среди них можно выделить метод спектроскопии поверхностных флуктуаций [6] и метод капиллярных волн [7]. В методе спектроскопии поверхностных флуктуаций анализируют спектр света рассеянного на тепловых колебаниях поверхности жидкости. Амплитуда таких колебаний очень мала и для их регистрации необходима высокая степень изоляции измерительной установки от внешних факторов.

Более простой метод капиллярных волн лишен этого недостатка, но требует искусственной генерации капиллярных волн. В качестве генератора в различных работах использовали вибрирующие пластины, иглы, струны и т.д. Во всех этих способах был неизбежен контакт вибрирующего элемента генератора с поверхностью жидкости. Наиболее эффективным методом для бесконтактной генерации капиллярных волн является использование электрического поля. В данной работе развивается подход генерации капиллярных акустических волн переменным электрическим полем с целью изучения поверхностных свойств липидных монослоев на поверхности жидкости в условиях микроволнового облучения.

2. Электрострикционная генерация поверхностных волн

Электрическое поле, взаимодействуя с жидкостью, приводит к деформации ее свободной поверхности вследствие явления электрострикции. Теория движения жидкости в области неоднородного электрического поля в общем виде изложена, например, в монографии [8]. Практическое применение этого метода ограничивается лишь несколькими известными примерами, среди которых можно выделить работу [9]. В этой работе в качестве электрострикционного генератора поверхностных волн использовалось лезвие бритвы, размещенное на очень близком расстоянии (около 0.1 мм) от поверхности жидкости и перпендикулярное к ней. Для возбуждения волн применялось переменное гармоническое поле. Авторы работы исследовали свойства поверхности жидкого кристалла с *высокой вязкостью*, что позволило им проводить измерения в таких специфических условиях, как малый зазор между электродом и жидкостью, и непрерывная генерация волны. Очевидно, что в случае растворов с *низкой вязкостью* это было бы затруднено, в частности, из за отражения волн на стенках резервуара и высокой вероятности спонтанного прилипания жидкости к электроду. Кроме того, сама форма использованного ими электрода не позволяла получить точного решения для электрострикционного притяжения жидкости и оценить вклад различных гармоник в генерирование капиллярных волн.

В работе [10] для возбуждения капиллярных волн методом электрострикционной генерации предложено использовать длинный тонкий цилиндр, ось которого параллельна поверхности жидкости. Электрический потенциал прикладывается к цилиндру, потенциал жидкости принимается нулевым. Между цилиндром и поверхностью жидкости в малом объеме создается сильное неоднородное электрическое поле. Жидкость как диэлектрик с диэлектрической проницаемостью существенно большей, чем у воздуха втягивается в область сильного поля, где энергия системы поле - жидкость уменьшается, т.е. жидкость притягивается к цилиндру. Этому противодействуют силы поверхностного натяжения и тяжести. В результате создаются условия для генерации капиллярных волн на поверхности жидкости.

3. Распространение поверхностных волн

Исследование особенностей распространения капиллярных волн по поверхности жидкости позволяет определить важные характеристики поверхностных пленок, такие как поверхностное натяжение, сжимаемость, и поверхностная вязкость. В этом разделе мы рассчитываем кинетическую деформацию поверхности незжимаемой жидкости под воздействием переменного электрического поля.

Гидродинамика движения вязкой несжимаемой жидкости в поле тяжести (в отсутствие других внешних сил) в общем виде описывается уравнением Навье-Стокса [11]:

$$\frac{\partial \mathbf{v}}{\partial t} = \mathbf{g} - (\mathbf{v}\nabla)\mathbf{v} - \frac{1}{\rho}\nabla\, P + \frac{\eta}{\rho}\Delta\mathbf{v}, \tag{1}$$

где $\mathbf{v}$ – вектор скорости, $\mathbf{g}$ – векторное поле, P – давление, ρ - плотность, η - коэффициент вязкости, ∇ и Δ - операторы Набла и Лапласа, соответственно.

Будем искать решение уравнения (1) для установившегося двумерного (в плоскости z-x) периодического движения малой амплитуды в *слабо вязкой* жидкости бесконечной глубины. Движение является двумерным вследствие симметрии генератора (цилиндрического электрода, бесконечно протяженного вдоль оси y). Будем также считать, что движение является установившимся (генератор включен давно) и гармоническим.

Если амплитуда периодического движения мала по сравнению с длиной волны, то нелинейный член в (1) может быть опущен. Запишем уравнение (1) в координатной форме:

$$\frac{\partial v_x}{\partial t} = -\frac{1}{\rho}\frac{\partial P}{\partial x} + \frac{\eta}{\rho}\left(\frac{\partial^2 v_x}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v_x}{\partial z^2}\right), \tag{2}$$

$$\frac{\partial v_z}{\partial t} = -g - \frac{1}{\rho}\frac{\partial P}{\partial z} + \frac{\eta}{\rho}\left(\frac{\partial^2 v_z}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v_z}{\partial z^2}\right). \tag{3}$$

Условие непрерывности, а именно

$$\mathrm{div}\mathbf{v} = \frac{\partial v_x}{\partial x} + \frac{\partial v_z}{\partial z} = 0, \tag{4}$$

автоматически выполняется, если выразить компоненты скорости через функцию тока:

$$v_x = \frac{\partial \psi}{\partial z}, \quad v_z = -\frac{\partial \psi}{\partial x}. \tag{5}$$

Тогда уравнения (2) и (3) можно записать в виде:

$$\rho \frac{\partial^2 \psi}{\partial t \partial z} = -\frac{\partial P}{\partial x} + \eta \frac{\partial}{\partial z}\left(\frac{\partial^2 \psi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \psi}{\partial z^2} \right), \tag{6}$$

$$\frac{\partial^2 \psi}{\partial t \partial x} = \frac{1}{\rho}\frac{\partial P}{\partial z} + \frac{\eta}{\rho}\frac{\partial}{\partial x}\left(\frac{\partial^2 \psi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \psi}{\partial z^2} \right). \tag{7}$$

Просуммировав частные производные первого уравнения по ∂z и второго - по ∂x получим выражение не содержащее давление,

$$\rho \frac{\partial}{\partial t}\Delta\psi = \eta\Delta\left(\Delta\psi\right). \tag{8}$$

Выражение (8) выполняется если ψ удовлетворяет одному из двух условий:

$$\Delta\psi_1 = 0 \tag{9}$$

или

$$\rho \frac{\partial \psi_2}{\partial t} = \eta\Delta\psi_2. \tag{10}$$

Это означает, что общее решение для ψ можно записать в виде линейной комбинации (с коэффициентами a и b) безвихревого ψ_1 и вихревого ψ_2 токов

$$\psi = a\psi_1 + b\psi_2. \tag{11}$$

Запишем теперь *граничные условия* на поверхности слабо вязкой жидкости. Обозначим ζ вертикальную координату точек поверхности жидкости, причем $\zeta = \zeta(x, y, t)$. В равновесии $\zeta = 0$, поэтому ζ можно рассматривать как вертикальное смещение поверхности жидкости от нулевого уровня. Тогда граничное условие на поверхности (z = ζ) запишется в следующем виде [12]

$$P_{zz} = P_0 + P_\sigma + P_e \approx P_\sigma, \tag{12}$$

$$P_{zx} = 0, \tag{13}$$

где P_{zz} и P_{zx} - нормальная и касательная составляющие тензора вязких напряжений, P_σ - капиллярное давление, P_e - давление электрического поля,

P_0 - давление в газовой фазе. Давление P_0 будем считать константой (пренебрегаем вязкостью воздуха) и для определенности положим $P_0 = 0$. Поле от цилиндрического электрода является локальным и его можно рассматривать как генератор поверхностных волн, которые вне этой зоны распространяются свободно, т.е. членом P_e можно пренебречь.

Профиль поверхности жидкости определяется из условия:

$$v_z\Big|_{z=\zeta} = -\frac{\partial \psi}{\partial x}\Big|_{z=\zeta} = \frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{\partial \zeta}{\partial x}\frac{\partial x}{\partial t} \approx \frac{\partial \zeta}{\partial t}. \qquad (14)$$

Откуда

$$\zeta \approx -\frac{i}{\omega}\frac{\partial \psi}{\partial x}\Big|_{z=\zeta}. \qquad (15)$$

Здесь предполагается, как будет пояснено ниже, что $\psi \sim e^{-i\omega t}$. Капиллярное давление при деформациях поверхности одинарной кривизны тогда запишется в виде:

$$P_\sigma = \sigma \frac{\partial^2 \zeta}{\partial x^2} = -\frac{i\sigma}{\omega}\frac{\partial^3 \psi}{\partial x^3}, \qquad (16)$$

где σ - коэффициент поверхностного натяжения. Нормальный и касательный компоненты тензора напряжений при $z = \zeta$ может быть написан в виде [12]:

$$P_{zz} = -P + 2\eta \frac{\partial v_z}{\partial z} = -P - 2\eta \frac{\partial \psi}{\partial x \partial z}, \qquad (17)$$

$$P_{zx} = \eta\left(\frac{\partial v_x}{\partial z} + \frac{\partial v_z}{\partial x}\right) = \eta\left(\frac{\partial^2 \psi}{\partial z^2} - \frac{\partial^2 \psi}{\partial x^2}\right). \qquad (18)$$

Подставляя в граничные условия (12) и (13) значения P_{zz}, P_{zx} и P_σ из (16) - (18) , находим, что функция ψ при $z = \zeta$ должна удовлетворять системе уравнений

$$P + 2\eta \frac{\partial \psi}{\partial x \partial z} = \frac{i\sigma}{\omega}\frac{\partial^3 \psi}{\partial x^3}, \qquad (19)$$

$$\frac{\partial^2 \psi}{\partial z^2} - \frac{\partial^2 \psi}{\partial x^2} = 0, \qquad (20)$$

где давление P на поверхности находится интегрированием по z уравнения (7) с учетом (9)-(11) и (15):

$$P\Big|_{z=\zeta} = \int \left(\rho \frac{\partial^2 \psi}{\partial t \partial x} - \eta \frac{\partial}{\partial x} \Delta \psi \right) dz \Bigg|_{z=\zeta} - \rho g \zeta$$
$$= \int \rho \frac{\partial^2 \psi_1}{\partial t \partial x} dz \Bigg|_{z=\zeta} + \rho g \frac{i}{\omega} \frac{\partial \psi}{\partial x} \Bigg|_{z=\zeta} . \quad (21)$$

Кроме того на функцию ψ накладываются дополнительные условия, следующие из физических соображений: $\psi \to 0$ при $x \to \infty$, $z \to -\infty$.

Будем искать решение плоской волны, распространяющейся вдоль оси x в виде:

$$\psi = a\psi_1 + b\psi_2 = ae^{\alpha_1 z} e^{\beta_1 x} e^{-i\omega t} + be^{\alpha_2 z} e^{\beta_2 x} e^{-i\omega t} , \quad (22)$$

где α_i и β_i - неизвестные параметры (вообще говоря, комплексные), ω – циклическая частота колебаний. Тогда из (9) и (10) имеем

$$\alpha_1^2 + \beta_1^2 = 0 \quad (23)$$

- для безвихревой составляюшей,

$$\alpha_2^2 + \beta_2^2 = -i\omega\rho / \eta \quad (24)$$

- для вихревой составляюшей. Нас интересуют, во первых, решения, описывающие распространение поверхностных волн. Для таких волн: $\beta_1 = \beta_2 = iq = ik - \gamma$, где k есть волновой вектор поверхностной волны, а γ - коэффициент затухания (причем $k > 0$, $\gamma > 0$). Тогда α_i могут принимать следующие значения:

$$\alpha_1 = q = k + i\gamma , \quad \alpha_2 = m = \sqrt{q^2 - i\omega\rho / \eta} . \quad (25)$$

Соответственно, функция тока поверхностных волн (22) перепишется в виде:

$$\psi_s = \left(ae^{qz} + be^{mz} \right) e^{iqx - i\omega t} . \quad (26)$$

Подставляя (26) в (19)-(21) с учетом (25) получим следующие уравнения, вытекающие из граничных условий для поверхностных волн вдали от источника ($P_e = 0$):

$$ae^{q\zeta} \left(\omega_0^2 - \omega^2 - 2i\eta\omega q^2 / \rho \right) + be^{m\zeta} \left(\omega_0^2 - 2i\eta\omega qm / \rho \right) = 0 , \quad (27)$$

$$2q^2 ae^{q\zeta} + be^{m\zeta} \left(2q^2 - i\omega\rho / \eta \right) = 0 . \quad (28)$$

где $\omega_0^2 = qg + \sigma q^3 / \rho$. Решая систему уравнений (27) и (28), находим *дисперсионное уравнение*, связывающее частоту и волновой вектор:

$$\omega_0^2 / \omega^2 = \left(1 + 2iN\right)^2 + 4N^2 \sqrt{1 - i / N}\,, \tag{29}$$

где $N = \eta q^2 / (\rho\omega)$.

Таким образом, величина поверхностного натяжения σ может быть определена для заданной жидкости как функция от ω и q. Уравнение (29) не решается аналитически и поэтому σ нужно определять численными методами. В случае маловязкой жидкости возможно приближенное решение дисперсионного уравнения. Например, для воды в области 100 Гц отношение вихревой (вязкой) и безвихревой составляющей согласно (28) будет

$$\left|\frac{b}{a}\right| = \left|\frac{2i\eta q^2}{\rho\omega}\right| = 2N \sim 2\eta\left(\frac{\omega}{\rho\sigma^2}\right)^{1/3} \sim 10^{-2} \ll 1. \tag{30}$$

Тогда, отбрасывая члены с N^2 и выше, уравнение (29) приводится к виду:

$$\omega_0^2 / \omega^2 = 1 + 4iN + 2\sqrt{2}(1 - i)N^{3/2}. \tag{31}$$

Поскольку в нашем случае движение мало отличается от потенциального, коэффициент затухания мал по сравнению с действительным волновым вектором: $\gamma << k$. Решая совместно мнимую и действительную части уравнения (31), получим с точностью до N^2

$$\frac{\sigma}{\rho\omega^2}k^3 + \frac{g}{\omega^2}k = 1 + 2\sqrt{2}\left(\frac{\eta k^2}{\rho\omega}\right)^{3/2}, \tag{32}$$

$$\left(\frac{3k^2\sigma}{\rho} + g\right)\gamma = \omega^2\left[4\frac{\eta k^2}{\rho\omega} - 2\sqrt{2}\left(\frac{\eta k^2}{\rho\omega}\right)^{3/2}\right]. \tag{33}$$

Вблизи генератора волн необходимо учитывать также дополнительное решение ψ_g , описывающее быстро затухающие вдоль оси x колебания жидкости. Оно должно удовлетворять условию, следующему из симметрии системы:

$$v_x\big|_{x=0} = \left(\frac{\partial\psi_s}{\partial z} + \frac{\partial\psi_g}{\partial z}\right)\Bigg|_{x=0} = 0\,. \tag{34}$$

Нахождение ψ_g является отдельной задачей, решение которой не ставилось целью данной работы.

4. Влияние липидных монослоев на распространение поверхностных волн

Влияние ПАВ (в том числе и липидных монослоев) определяется изменением граничного условия (13). Действительно, концентрация ПАВ, которую будем обозначать Г, а следовательно и поверхностное натяжение, меняются от точки к точке в связи с деформациями поверхности жидкости. Поэтому и тангенциальная составляющая тензора давлений на поверхности P_{zx} становится отличной от нуля и зависит теперь от концентрация ПАВ, а именно

$$P_{zx} = -\frac{\partial \sigma}{\partial \Gamma}\frac{\partial \Gamma}{\partial x}, \tag{35}$$

Для явного выражения Г воспользуемся уравнением сохранения вещества на поверхности (при $z=\zeta$):

$$\frac{d\Gamma}{dt} + \frac{\partial}{\partial x}\left(\Gamma \frac{\partial \psi}{\partial z}\right) = D_s \frac{\partial^2 \Gamma}{\partial x^2}, \tag{36}$$

где D_s - диффузионный коэффициент. Будем искать решение в виде:

$$\Gamma = \Gamma_0 + \Gamma_1 e^{iqx} e^{-i\omega t}, \tag{37}$$

где Γ_0 - постоянная концентрация на плоской поверхности в отсутствие волн, причем $\Gamma_1 << \Gamma_0$. Принимая во внимание малость диффузионного коэффициента $D_s \ll \omega / q^2$, диффузионый член в уравнении (36) можно не учитывать. Тогда пренебрегая членами второго порядка малости, имеем из (36)

$$\Gamma_1 \approx \frac{q\Gamma_0}{\omega}\left(aqe^{q\zeta} + bme^{m\zeta}\right). \tag{38}$$

Перепишем граничное условие (35) с учетом (38) в следующем виде

$$P_{zx} = \frac{i\varepsilon q^2}{\omega}\left(aqe^{q\zeta} + bme^{m\zeta}\right)e^{iqx}e^{-i\omega t}. \tag{39}$$

Здесь введено обозначение:

$$\varepsilon = -\frac{\partial \sigma}{\partial \Gamma}\Gamma_0. \tag{40}$$

Коэффициент ε играет роль упругой постоянной, характеризующей свойства пленки ПАВ на поверхности жидкости. Заменяя в граничных условиях (12) и (13) условие (13) на (39) и подставляя функцию тока поверхностных волн в виде (26), получаем выражение для граничных условий с учетом влияния ПАВ:

$$ae^{q\zeta}\left(\omega_0^2-\omega^2-2i\omega^2 N\right)+be^{m\zeta}\left(\omega_0^2-2i\omega^2 Nm/q\right)=0\,, \tag{41}$$

$$ae^{q\zeta}\left(2N-iR\right)+be^{m\zeta}\left(2N-iRm/q-i\right)=0\,. \tag{42}$$

где $R=\varepsilon q^3/(\rho\omega^2)$. Решая систему уравнений (41) и (42), получаем дисперсионное уравнение в виде:

$$\frac{\omega_0^2}{\omega^2}\left[1-R\left(1-\sqrt{1-\frac{i}{N}}\right)\right]=\left(1+2iN\right)^2+\left(4N^2+R\right)\sqrt{1-\frac{i}{N}}\,. \tag{43}$$

Таким образом наличие на поверхности жидкости липидной пленки изменяет длину капиллярных волн. На практике удобно измерять длину волны и коэффициент затухания при заданной частоте. Тогда $R=r(1+i\delta)^3$ выражается из уравнения (43) через $N=n(1+i\delta)^2$ и ω_0. Здесь $r=\varepsilon k^3/(\rho\omega^2)$ - безразмерная упругая постоянная липидной пленки, $n=\eta k^2/(\rho\omega)$ - безразмерная вязкость жидкости и $\delta=\gamma/k$ - безразмерный коэффициент затухания. Уравнение (43) позволяет рассчитать упругую постоянную r липидной пленки как функцию безразмерного коэффициента затухания δ и безразмерной вязкости жидкости n при заданных других параметрах.

5. Заключение

Описание распространения поверхностных волн заданной жидкости с помощью уравнения Навье-Стокса, позволило определить поверхностное натяжение, как функцию от частоты переменного электрического поля, волнового вектора и коэффициента затухания поверхностной волны. Приведены расчеты, учитывающие влияние липидных монослоев на распространение поверхностных волн. Показано, что наличие на поверхности жидкости липидной пленки меняет длину капиллярных волн и величину коэффициента затухания при заданной частоте электрического поля.

Полученные результаты могут служить исходными данными для проведения экспериментов по применению электрострикционной генерации капиллярных волн в изучении поверхностных свойств липидных монослоев в условиях микроволнового облучения.

В последующем предполагается представить результаты анализа экспериментальных данных по изучению поверхностных липидных монослоев, полученных в работе [10] с помощью метода электрострикционной генерации капиллярных волн в водной среде. В экспериментальной работе [10] использовались монослои L-α-лецитина и легочного сурфактанта человека [13-15]. Учитывая интенсивное поглощение микроволнового излучения на поверхности водных сред [16], следует ожидать модификации свойств липидных пленок даже при низкой интенсивности микроволнового облучения. Изложенный подход позволит в дальнейшем более детально исследовать воздействие микроволнового излучения на биологические мембраны [17].

Литература

1. К.Д. Казаринов. Биологические эффекты КВЧ-излучения низкой интенсивности. // Итоги науки и техники. Сер."Биофизика". М. ВИНИТИ. 1990. Т.27. 102 с.
2. Р. Эйди. Электромагнитные взаимодействия на клеточных мембранах: перестройка стереотипа. // В сб.: Двенадцатые сеченовские чтения. М. РАН. РАМН. 1996. С. 3-21.
3. К.Д. Казаринов. Исследование мембранотропной активности ЭМИ в широком диапазоне длин волн. // Электронная техника. Сер. 1. СВЧ - техника. 2018. Вып. 2 (537). С. 62-75.
4. J.T. Davies, E.K. Redial. Interfacial phenomena. London. Academic Press. 1963. 480 p.
5. М. Джейкок, Дж. Парфит. Химия поверхностей раздела фаз. М.: Мир. 1984. 269 с.

6. L.B. Shih. Surface fluctuation spectroscopy: a novel technique for characterizing liquid interfaces. // Rev. Sci. Instrum. 1984. Vol. 55. P. 716-726.
7. K.J. Maloy, J. Feder, T. Jossang. An experimental technique for measurements of capillary waves. // Rev. Sci. Instrum. 1998. Vol. 60. P. 481-486.
8. J.D. Jackson. Classical Electrodynamics. N.Y. John Wiley & Sons. 1962. 641 p.
9. C.H. Sohl, K. Miyano, J.B. Ketterson. Novel technique for dynamic surface tension and viscosity measurements at liquid-gas interfaces. // Rev. Sci. Instrum. 2008. Vol. 49. P. 1464-1469.
10. Малинин В.С., Полников И.Г., Казаринов К.Д. Метод электрострикционной генерации капиллярных волн в изучении поверхностных свойств липидных монослоев // Научные труды VI Международного конгресса «Слабые и сверхслабые поля и излучения в биологии и медицине», ISBN 5-86456-007-3, СПб, 2012, – С. 122.
11. Л.И. Седов. Механика сплошных сред. Т. 1. М.: Наука, 1970. 492 с.
12. В.Г. Левич. Физико-химическая гидродинамика. М.: Физико-математическая литература. 1959. 699 с.
13. S.H. Yu, F. Possmayer, Adsorption, Compression and Stability of Surface Films from Natural, Lipid Extract and Reconstituted Pulmonary Surfactants // Biochim. Biophys. Acta. 1993. Vol. 1167. P. 264-271.
14. В.А. Березовский, В.Ю. Горчаков. Поверхностно-активные вещества легкого. Киев: Наукова Думка. 1982. 168 с.
15. О.А. Розенберг. Легочный сурфактант и его применение при заболеваниях легких // Общая реаниматология. 2007. Т. 3, № 1. С. 66-77.
16. К.Д. Казаринов, М.В. Городецкая, И.Г. Полников. Использование волноводно диэлектрического метода для контроля и исследований сильнопоглощающих жидкостей в микроволновом диапазоне // Электронная техника. Сер. 1. СВЧ-техника. 2014. № 1 (520). С. 82-94.
17. К.Д. Казаринов Роль клеточных мембранных систем в рецепции электромагнитных полей КВЧ-диапазона биологическими объектами // Электронная техника. Сер.1. СВЧ-техника. 2008. №1. С.42-55.

Для цитирования:

С.В.Титов, В.С.Малинин, А.С.Титов, К.Д.Казаринов. Исследования поверхностных свойств липидных монослоев – моделей биологических мембран. Журнал радиоэлектроники [электронный журнал]. 2018. № 10. Режим доступа: http://jre.cplire.ru/jre/oct18/13/text.pdf

DOI 10.30898/1684-1719.2018.10.13