

СЕЛЕКТИВНЫЙ НАГРЕВ МЕМБРАНОФОРМИРУЮЩИХ ОТВЕРСТИЙ В ТЕФЛОНОВОЙ ПЛЕНКЕ ПРИ ОБЛУЧЕНИИ ДЕЦИМЕТРОВЫМИ ВОЛНАМИ

© 2015 г. С.И. Алексеев, Е.Е. Фесенко (мл.), Е.Е. Фесенко

Институт биофизики клетки РАН, 142290, Пущино Московской области, ул. Институтская, 3

E-mail: stan.alexeev@gmail.com

Поступила в редакцию 23.07.15 г.

Проведены расчеты нагрева мембраноформирующего отверстия в тефлоновой пленке при облучении дециметровыми волнами. Исследована зависимость прироста температуры в мембраноформирующем отверстии от его геометрии, концентрации раствора электролита, частоты дециметрового облучения. Получена кинетика нагрева отверстия в зависимости от его диаметра. Делается вывод о том, что обнаруженные в экспериментах эффекты дециметровых волн на бислойные липидные мембраны обусловлены концентрированием электромагнитного поля дециметровых волн в мембраноформирующем отверстии, приводящим к селективному нагреву электролита в отверстии с бислойными липидными мембранами.

Ключевые слова: бислойные липидные мембраны, дециметровые волны, мембраноформирующее отверстие, селективный нагрев отверстия.

Ранее в ряде работ было показано, что при облучении бислойных липидных мембран (БЛМ) дециметровыми волнами на частоте 0,9 ГГц имеет место заметное изменение проводимости этих мембран [1–6]. БЛМ формировали на отверстиях диаметром 0,2–1,0 мм в тефлоновой пленке толщиной 0,1–0,2 мм. Направленность эффектов и их величины коррелировали с температурными изменениями модифицированных мембран. За время облучения в течение 2–4 с с удельной поглощаемой мощностью в растворе, равной 200 Вт/кг, изменения проводимости достигали максимальной величины и были эквивалентны нагреву БЛМ на 6–7°C, в то время как прирост температуры окружающего электролита не превышал 0,2°C. Была выдвинута гипотеза, что эффект дециметровых волн обусловлен значительной концентрацией электрического поля в мембраноформирующем отверстии и последующим нагревом отверстия с БЛМ. Проведенные расчеты распределения электрического поля и удельной поглощаемой мощности в отверстии в тефлоновой пленке, помещенной в раствор электролита различной концентрации, подтвердили нашу гипотезу о значительной концентрации электрического поля в отверстии [7]. Предварительная оценка нагрева отверстия приведена в работе [8]. Было показано, что изменения проводимости БЛМ,

полученные в эксперименте, эквивалентны расчетному нагреву отверстия. Поскольку нагрев отверстия при облучении дециметровыми волнами может иметь большой практический интерес в биологии и физике, то представляется целесообразным детальное исследование нагрева отверстия под их действием.

МЕТОДЫ

Численные расчеты распределения поля и удельной поглощаемой мощности были проведены с использованием коммерческой программы (Remcom, Inc., St. Louis, MO, США), основанной на методе конечных разностей во временной области или FDTD-методе [9]. Детали использования FDTD-метода применительно к описываемой геометрии подробно описаны нами в работе [7].

Для расчетов температуры нами были использованы следующие уравнения теплопроводности в цилиндрических координатах:

$$\frac{\rho_1 C_1}{k_1} \frac{\partial T_1}{\partial t} = \frac{\partial^2 T_1}{\partial z^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T_1}{\partial r} + \frac{\partial^2 T_1}{\partial r^2} + \frac{Q(z,r,t)}{k_1} \quad (1)$$

для отверстия ($0 \leq r \leq r_0$) и

$$\frac{\rho_2 C_2}{k_2} \frac{\partial T_2}{\partial t} = \frac{\partial^2 T_2}{\partial z^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T_2}{\partial r} + \frac{\partial^2 T_2}{\partial r^2} \quad (2)$$

Сокращение: БЛМ – бислойные липидные мембраны.

для тефлоновой пленки ($r \geq r_o$). В уравнениях (1) и (2) $T_1 = T_h - T_f$, $T_2 = T_{Tef} - T_f$, T_h – температура электролита в отверстии, T_f – температура электролита в окружающей среде, T_{Tef} – температура тефлоновой пленки, ρ_1 и C_1 – плотность и теплоемкость электролита соответственно, ρ_2 и C_2 – плотность и теплоемкость тефлона соответственно, k_1 и k_2 – коэффициенты теплопроводности электролита и тефлона соответственно, r_o – радиус отверстия. В расчетах было принято, что удельное тепловыделение $Q(z,r,t)$ пропорционально среднему значению удельной поглощаемой мощности в отверстии. Поскольку поглощение дециметровых волн в тефлоне крайне низкое, то в тефлоновой перегородке $Q(z,r,t) = 0$. Численное решение уравнений (1) и (2) детально описано в работе [8]. Термофизические параметры, использованные для расчетов, приведены в табл. 1.

РЕЗУЛЬТАТЫ

В ранних работах основные экспериментальные результаты были получены при облучении бислойных липидных мембран с удельной поглощаемой мощностью, равной 200 Вт/кг. Удельную поглощаемую мощность определяли по начальной скорости роста температуры в окружающем растворе электролита по следующей формуле [10]:

$$УПМ = C \frac{dT}{dt} \Big|_{t=0}, \tag{3}$$

где C – теплоемкость раствора электролита. Поэтому во всех расчетах плотность потока мощности облучения брали таким образом, чтобы удельная поглощаемая мощность в растворе была равной 200 Вт/кг. В 1,0 М растворе NaCl это соответствует электрическому полю, равному 225 В/м. В экспериментах с БЛМ было показано, что максимальный эффект дециметровых волн достигается при ориентации электрического поля перпендикулярно плоскости тефлоновой пленки. Зависимость удельной поглощаемой мощности от угла между электрическим полем и плоскостью пленки (α) выражается следующим соотношением [8]:

$$УПМ(\alpha) = (УПМ_{max} - УПМ_{min}) \cos(\alpha) + УПМ_{min} \tag{4}$$

где $УПМ_{max}$ и $УПМ_{min}$ – максимальное и минимальное значение удельной поглощаемой мощности при изменении угла от 0 до 90°. В температурных расчетах были использованы

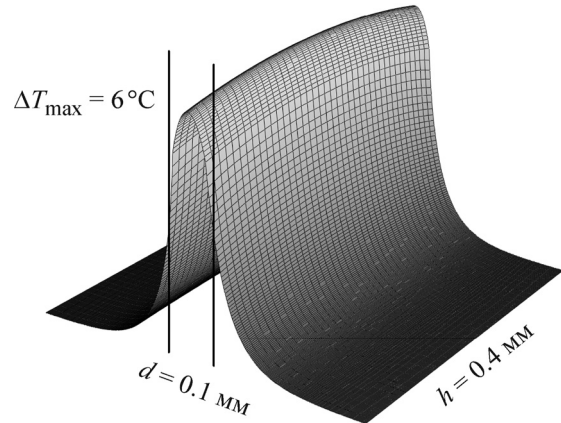


Рис. 1. Трехмерное изображение распределения прироста температуры в горизонтальной плоскости, проведенной через центр отверстия перпендикулярно тефлоновой пленке. Диаметр d и длина h отверстия равны 0,1 мм и 0,4 мм соответственно. Раствор электролита – 1,0 М NaCl, частота облучения – 0,9 ГГц, удельная поглощаемая мощность в растворе 200 Вт/кг.

максимальные значения удельной поглощаемой мощности, полученные при перпендикулярной ориентации электрического поля.

На рис. 1 приведен профиль прироста температуры (ΔT) в плоскости, перпендикулярной тефлоновой перегородке и проходящей через центр отверстия. При данной геометрии отверстия удельная поглощаемая мощность в отверстии составляла 3261,3 Вт/кг. Из рисунка видно, что ΔT резко возрастает в центре отверстия и меняется незначительно вдоль его оси. Вне отверстия температура быстро падает до температуры внешнего раствора благодаря эффективной диссипации тепла за счет свободной конвекции в растворе. Падение температуры по радиальному направлению обусловлено диссипацией тепла за счет теплопроводности тефлона.

Удельная поглощаемая мощность в отверстии растет с уменьшением диаметра отверстия и с увеличением толщины тефлоновой пленки [7]. В табл. 2 приведены значения удельной поглощаемой мощности, рассчитанные для отверстий диаметром 0,1–1,0 мм в тефлоновой

Таблица 1. Термофизические параметры, использованные при температурном моделировании нагрева отверстия в тефлоновой перегородке при дециметровом облучении

Материал	ρ , кг/м ³	C , Дж/(кг·К)	κ , Вт/(м·К)
Электролит	1060	4180	0,61
Тефлон	2170	1010	0,23

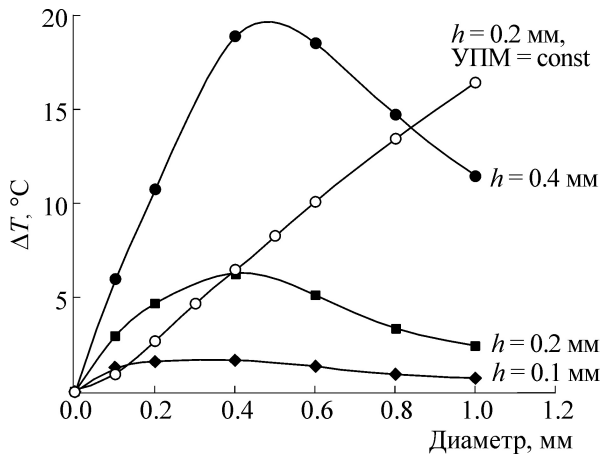


Рис. 2. Зависимости прироста температуры в центре отверстия в тефлоновой пленке различной толщины h от диаметра отверстия. Кривая, проведенная через светлые кружки, получена для толщины тефлоновой пленки 0,2 мм и постоянной удельной поглощаемой мощности в центре отверстия такой же, как в тефлоновой пленке толщиной 0,2 мм и диаметром отверстия 0,4 мм. Раствор электролита – 1,0 М NaCl, частота облучения – 0,9 ГГц, удельная поглощаемая мощность в растворе – 200 Вт/кг. УПМ – удельная поглощаемая мощность

пленке толщиной 0,2 мм в 1,0 М растворе NaCl. С уменьшением диаметра отверстия и увеличением толщины тефлоновой пленки удельная поглощаемая мощность возрастает. На рис. 2 приведены зависимости ΔT от диаметра и длины отверстия. В отличие от распределения удельной поглощаемой мощности зависимость ΔT от диаметра отверстия имеет колоколообразную форму с максимумом около 0,4 мм. Прирост температуры увеличивается с ростом длины отверстия. Несмотря на увеличение удельной поглощаемой мощности спад ΔT с уменьшением диаметра отверстия связан с ростом диссипации тепла. Уменьшение же ΔT с ростом диаметра отверстия связано с уменьшением удельной поглощаемой мощности в отверстии. Такой вывод подтверждается поведением зависимости ΔT от диаметра отверстия при постоянной удельной поглощаемой мощности, равной ее величине в отверстии диаметром 0,4 мм (рис. 2, светлые кружки). Как видно,

Таблица 2. Значения удельной поглощаемой мощности в отверстии различного диаметра в тефлоновой пленке толщиной 0,2 мм

Диаметр, мм	0,1	0,2	0,4	0,6	0,8	1,0
УПМ, Вт/кг	2138	1026	453	229	116	68

Примечание. Удельная поглощаемая мощность в растворе – 200 Вт/кг. Раствор электролита – 1,0 М NaCl.

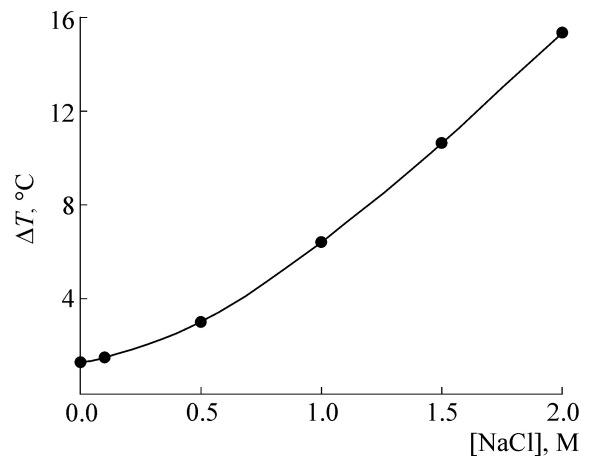


Рис. 3. Зависимость прироста температуры в центре отверстия в тефлоновой пленке от концентрации раствора NaCl при облучении с частотой 0,9 ГГц и удельной поглощаемой мощности, равной 200 Вт/кг. Диаметр отверстия – 0,4 мм, толщина тефлоновой пленки – 0,2 мм.

ΔT в этом случае растет с увеличением диаметра отверстия, но имеет более низкие значения при малых значениях диаметра. Следует отметить, что при постоянном отношении диаметра к длине отверстия удельная поглощаемая мощность сохраняется неизменной. Однако ΔT не подчиняется такой закономерности. При уменьшении диаметра и длины отверстия нагрев отверстия падает.

Нагрев отверстия сильно зависит от концентрации электролита (рис. 3). Прирост температуры увеличивается почти в восемь раз при увеличении концентрации NaCl от 0,0 до 2,0 М. Этот эффект объясняется увеличением удельной поглощаемой мощности в отверстии с ростом концентрации раствора [7]. Подъем температуры в отверстии имеет место даже в чистой воде, проводимость которой для постоянного тока равна нулю. Это связано с тем, что высокочастотная проводимость воды имеет конечное значение. Для частоты 0,9 ГГц эта проводимость составляет около 0,2 См/м.

На рис. 4 приведена зависимость нагрева отверстия от частоты облучения в диапазоне 0,2–4,0 ГГц. Как видно, с уменьшением частоты облучения ΔT резко возрастает. Увеличение ΔT является результатом роста удельной поглощаемой мощности в отверстии при уменьшении частоты.

При температуре окружающего раствора 20°C облучение с частотой 0,2 ГГц может привести к перегреву отверстия свыше 100°C, т.е. привести к кипению жидкости в отверстии и образованию в отверстии пузырьков воздуха.

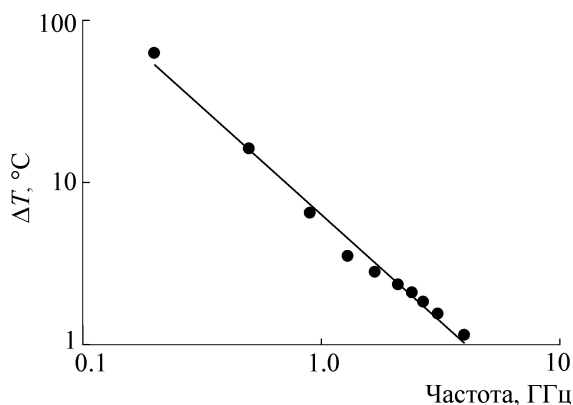


Рис. 4. Зависимость прироста температуры в центре отверстия диаметром 0,4 мм в тефлоновой пленке толщиной 0,2 мм от частоты облучения с удельной поглощаемой мощностью, равной 200 Вт/кг. Электролит – 1,0 М NaCl.

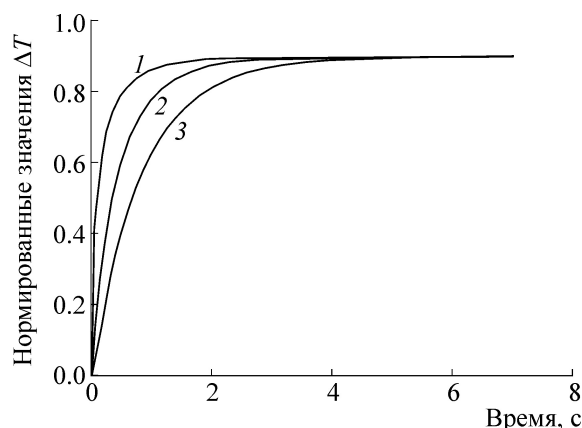


Рис. 5. Кинетика роста температуры в центре отверстия диаметрами 0,1 (1), 0,4 (2) и 1,0 мм (3) в тефлоновой пленке толщиной 0,2 мм при облучении с частотой 0,9 ГГц и удельной поглощаемой мощностью, равной 200 Вт/кг. Электролит – 1,0 М раствор NaCl.

Подобный эффект наблюдали в лавсановой диафрагме, помещенной в электролит, при приложении постоянного напряжения [11,12]. Образование пузырька выполняло функцию размыкателя тока через диафрагму. При схлопывании пузырька ток восстанавливался. Таким образом, авторы регистрировали автоколебательный процесс тока. К перегреву отверстия до 100°C может привести как увеличение мощности облучения, так и увеличение толщины тефлоновой пленки и концентрации электролита при частоте облучения выше 0,2 ГГц.

Следует отметить, что разогрев относительно малых отверстий является достаточно быстрым процессом. На рис. 5 представлена кинетика нагрева отверстий разного диаметра. С увеличением диаметра отверстия увеличивается и время выхода температуры на стационарный уровень. Для отверстий диаметром 0,1–1,0 мм стационарное значение температуры достигается за 2–4 с облучения. Такую же кинетику изменения проводимости БЛМ наблюдали при облучении дециметровыми волнами.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Как показано в настоящей работе, отверстия в диэлектрических пленках, помещенных в раствор электролита, являются хорошими концентраторами электромагнитного поля дециметровых волн. Повышенное поглощение энергии поля приводит к значительному разогреву этих отверстий. Диэлектрические перегородки с отверстиями 0,2–1,0 мм широко используются для исследования проводимости БЛМ, модифицированных различными каналобразующими и жирорастворимыми агентами [13]. БЛМ формируются на отверстиях в диэлектрической пе-

регородке с помощью стандартных методов [14]. В качестве диэлектрической перегородки в своих ранних работах мы использовали тефлоновые пленки. Проведенные расчеты показывают, что облучение тефлоновой пленки с отверстием дециметровыми волнами с удельной поглощаемой мощностью, равной 200 Вт/кг, типичной для многих экспериментов, повышает температуру электролита в отверстии на 6–7 градусов. Такое увеличение температуры способно приводить к изменению проводимости БЛМ в отверстии диэлектрической перегородки, наблюдаемому в эксперименте.

Зависимость эффектов дециметровых волн от концентрации электролита, размеров отверстий и толщины пленки также количественно совпадает с рассчитанной зависимостью эквивалентного разогрева отверстия от этих параметров. Кинетика изменения проводимости БЛМ хорошо согласуется с кинетикой нагрева отверстия. Поэтому можно утверждать, что обнаруженные в экспериментах эффекты дециметровых волн на бислоиные липидные мембраны обусловлены нагревом электролита в отверстии в тефлоновой пленке, а вместе с ним и БЛМ. Несмотря на значительную концентрацию электромагнитного поля в отверстии (амплитуда электрического поля в отверстии может в 78 раз превышать ее значение в растворе [7]), других эффектов дециметровых волн на БЛМ, кроме тепловых, не было зарегистрировано.

Следует отметить, что выявленные особенности взаимодействия дециметровых волн с неоднородными структурами крайне важны для адекватной интерпретации механизмов их дей-

ствия на биологические объекты. При исследовании эффектов дециметровых волн необходимы анализ распределения поля и оценка возможности селективного нагрева неоднородных биологических структур.

Также селективный нагрев отверстий в диэлектрических пленках может представлять и инженерный интерес, например, при создании калориметрического измерителя мощности. Ячейка с диэлектрической пленкой и отверстием в ней, заполненная электролитом, могла бы служить детектором мощности дециметрового излучения. Рост температуры в отверстии мог бы заметно уменьшить сопротивление отверстия. Измеряя сопротивление отверстия для постоянного тока, можно откалибровать детектор для измерения мощности. Такой измеритель мощности помимо высокой чувствительности обладал бы способностью определять направление электрического поля, поскольку максимальный нагрев отверстия происходит при перпендикулярной ориентации электрического поля относительно диэлектрической пленки.

Другим применением эффекта концентрации электрического поля в отверстии может быть исследование свойства плазменного или диафрагменного разряда в электролите в высокочастотной области.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. В. В. Тяжелов, С. И. Алексеев и П. А. Григорьев, *Биофизика* **23**(4), 732 (1978).
2. С. И. Алексеев, В. В. Тяжелов, П. А. Григорьев и Г. И. Сидень, *Биофизика* **25**(4), 735 (1980).
3. С. И. Алексеев, В. В. Тяжелов, Л. Х. Фаизова и В. В. Чертищев, *Биофизика* **27**(1), 162 (1982).
4. С. И. Алексеев, В. В. Чертищев и Ю. А. Ким, *Биофизика* **27** (3), 545 (1982).
5. И. Г. Акоев, О. В. Коломыткин и В. И. Кузнецов, *Радиобиология* **23** (5), 670 (1983).
6. И. Г. Акоев, В. В. Тяжелов, О. В. Коломыткин и др., *Изв. АН СССР. Вып 1*, 41 (1985).
7. С. И. Алексеев, М. С. Зискин и Е. Е. Фесенко, *Биофизика* **54** (3), 488 (2009).
8. S. I. Alekseev, E. E. Fesenko, and M. C. Ziskin, *IEEE Trans. Biomed. Eng.* **57** (10), 2517 (2010).
9. K. S. Kunz and R. J. Luebbers, *The finite difference time domain method for electromagnetics* (Boca Raton, Florida: CRC Press, Inc., 1993).
10. С. И. Алексеев, М. С. Зискин и Е. Е. Фесенко, *Биофизика* **56** (3), 561 (2011).
11. В. С. Тесленко, А. П. Дрожжин и А. М. Карташов, *Письма в ЖТФ* **27** (20), 83 (2001).
12. В. С. Тесленко, А. П. Дрожжин и Г. Н. Санкин, *Письма в ЖТФ* **32** (4), 24 (2006).
13. D. A. Haydon and S. V. Hladky, *Q. Rev. Biophys.* **5**(2), 187, (1972).
14. P. Mueller, D. O. Rudin, N. T. Tien, and W. C. Wescott, *J. Phys. Chem.* **67** (2), 534 (1963).

Selective Heating of Membrane-forming Holes in Teflon Film Exposed to Decimeter Waves

S.I. Alekseev, E.E. Fesenko Jr., and E.E. Fesenko

*Institute of Cell Biophysics, Russian Academy of Sciences,
ul. Institutskaya 3, Pushchino, Moscow Region, 142290 Russia*

Calculations of heating of membrane-forming holes in Teflon film exposed to decimeter waves were performed. The dependence of the temperature increment in holes on the geometry of holes, electrolyte concentration, and decimeter wave frequency was studied. The kinetics of heating depending on the hole diameter was also obtained. It was concluded that the observed in the experiment effects of the decimeter wave on bilayer lipid membranes resulted from the elevated concentration of decimeter electromagnetic waves in membrane-forming hole that led to selective heating of electrolyte in hole and bilayer lipid membranes.

Key words: bilayer lipid membranes, decimeter waves, membrane-forming hole, selective heating in the hole