

Т.С. Бакиров, В.С. Генералов, О.В. Фефелов

Решение задачи взаимодействия электрических полей с частицами биогенного происхождения

НИИ азробиологии ГНЦ ВБ «Вектор», пос. Кольцово, Новосибирская область

Поступила в редакцию 17.01.2001 г.

Проблема отбора проб, разделения и идентификации частиц биогенного происхождения в верхних слоях атмосферы и в космосе представляет большой научный интерес и может быть решена с помощью применения высокочастотных электрических и магнитных полей. В результате решения прямой задачи взаимодействия электрических полей с частицами биогенного происхождения определяются дипольный момент и поляризуемость частицы, а также скорость движения частицы в жидкости или в воздухе во внешнем электрическом поле в широком диапазоне частот. Решение обратной задачи заключается в определении структуры и основных электрических характеристик (проводимость и диэлектрическая проницаемость цитоплазмы и мембраны) биологических частиц по измерениям скорости движения частиц в жидкости или в воздухе на различных частотах электрического поля.

Введение

Проблема отбора проб, разделения и идентификации частиц биогенного происхождения в верхних слоях атмосферы и в космосе представляет большой научный интерес и может быть решена с помощью применения высокочастотных электрических и магнитных полей [1, 2].

В предыдущей работе [2] описано устройство для отбора биочастиц в открытом космосе, позволяющее затормозить частицы биогенного происхождения с помощью высокочастотных электрических и магнитных полей. В настоящей статье рассматривается проблема детальной идентификации отобранных частиц биогенного происхождения на основе диэлектрофореза их в широком диапазоне частот.

Целью настоящей работы является решение прямой и обратной задач взаимодействия электрических полей с частицами биогенного происхождения. В результате решения прямой задачи определяются дипольный момент, коэффициент поляризуемости, а также скорость поступательного движения частицы в жидкости или в воздухе исходя из известных значений проводимости и диэлектрической проницаемости цитоплазмы и мембраны. Решение обратной задачи заключается в определении основных электрических характеристик (удельная проводимость и диэлектрическая проницаемость цитоплазмы и мембраны) биологических частиц по измерениям скорости движения частиц в жидкости или в воздухе на различных частотах электрического поля.

Взаимодействие электрических полей с частицами

В частице, находящейся в неоднородном переменном электрическом поле с напряженностью E , наводится дипольный момент

$$d = \alpha \varepsilon_0 E = \alpha \varepsilon_0 E_0 \sin \omega t, \quad (1)$$

где α – коэффициент поляризуемости частицы; ε_0 – диэлектрическая постоянная вакуума; E_0 , ω – амплитуда напряженности и частота колебаний электрического поля. Из-за неоднородности поля на частицу действует сила

$$\langle \mathbf{F} \rangle = \frac{1}{2} \nabla (dE_0) = \frac{1}{4} (\alpha \varepsilon_0 \nabla E_0^2). \quad (2)$$

Под действием этой силы частица в жидкости движется со средней скоростью v , и сила со стороны электрического поля уравновешивается силой вязкого трения F , которая для сферической частицы описывается формулой Стокса:

$$F = 6\pi\eta Rv, \quad (3)$$

где η – вязкость жидкости; R – радиус клетки.

Величин дипольного момента и силы F зависят как от электрических свойств среды, так и от свойств биологической частицы, а также от частоты переменного электрического поля. На некоторых интервалах частот биологические частицы двигаются из области с высокой напряженностью поля в область с низкой напряженностью поля, а на других интервалах в обратную сторону, причем набор равновесных частот, т.е. частот, на которых биологическая частица остается в покое, индивидуален для каждого вида частиц.

Для мертвых микроорганизмов, а также небактериальных частиц зависимость силы от частоты переменного электрического поля принципиально отличается от зависимости для живых микроорганизмов. На этом принципе создаются устройства по разделению и сортировке биологических частиц [2–4].

Расчет дипольного момента и коэффициента поляризуемости клетки произвольной формы

Обычно клетку рассматривают как сферическое тело радиусом R (рис. 1), с диэлектрической проницаемостью

цитоплазмы $\epsilon_{\text{цит}}$, удельной проводимостью $\sigma_{\text{цит}}$, покрытое однородной мембраной толщины δ с удельной проводимостью $\sigma_{\text{мем}}$, диэлектрической проницаемостью $\epsilon_{\text{мем}}$, находящейся в жидкости с характеристиками $\sigma_{\text{ж}}$ и $\epsilon_{\text{ж}}$. Используя определение комплексной диэлектрической проницаемости $\epsilon^* = \epsilon + i\sigma/\omega$, где ω – угловая частота электрического поля, можно получить для дипольного момента клетки аналитическое выражение [6].

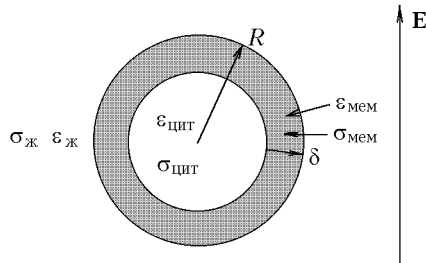


Рис. 1. Схема и основные параметры клетки, учитываемые при взаимодействии с переменным электрическим полем

Основные химические компоненты плазматической мембраны – это белки и липиды, в связи с этим относительная диэлектрическая проницаемость мембраны составляет 2–4. Мембрана является хорошим изолятором, ее удельная проводимость составляет 0,5–50 мкСм/м [5]. Цитоплазма содержит растворы солей и является хорошим проводником, ее удельная проводимость составляет 1–4 См/м. Относительная диэлектрическая проницаемость цитоплазмы равна примерно 60–80 [5].

В случае произвольной формы клетки задача нахождения дипольного момента клетки не имеет аналитического решения, поэтому в данной статье использовался численный метод. Поверхность клетки аппроксимируется многогранником с большим количеством граней (до 5000). На каждую из граней помещается заряд q_i с постоянной плотностью, который находится из граничных условий на границах между цитоплазмой, мембраной и жидкостью:

$$\epsilon_{\text{цит}}^* E_{\perp \text{цит}}^* = \epsilon_{\text{мем}}^* E_{\perp \text{мем}}^* \quad (4)$$

$$\epsilon_{\text{мем}}^* E_{\perp \text{мем}}^* = \epsilon_{\text{ж}}^* E_{\perp \text{ж}}^* \quad (5)$$

Заряды на каждой из N граней определяются из системы N линейных уравнений, связывающих скачок напряженности электрического поля с плотностью заряда на границе раздела сред с разной диэлектрической проницаемостью:

$$\epsilon_{\text{цит}}^* (\mathbf{E}_0 \mathbf{n}_i + \sum_{j \neq i}^N \mathbf{n}_j q_j \mathbf{m}_{ij} - 2\pi \frac{q_i}{S_i}) = \epsilon_{\text{мем}}^* (\mathbf{E}_0 \mathbf{n}_i + \sum_{j \neq i}^N \mathbf{n}_j q_j \mathbf{m}_{ij} + 2\pi \frac{q_i}{S_i}), \quad (6)$$

$$\epsilon_{\text{мем}}^* (\mathbf{E}_0 \mathbf{n}_i + \sum_{j \neq i}^N \mathbf{n}_j q_j \mathbf{m}_{ij} - 2\pi \frac{q_i}{S_i}) = \epsilon_{\text{ж}}^* (\mathbf{E}_0 \mathbf{n}_i + \sum_{j \neq i}^N \mathbf{n}_j q_j \mathbf{m}_{ij} + 2\pi \frac{q_i}{S_i}), \quad (7)$$

где \mathbf{n}_i – вектор нормали i -й грани, направленный от среды с ϵ_{1i}^* к среде с ϵ_{2i}^* ; \mathbf{m}_{ij} – напряженность электрического поля, создаваемого j -м единичным зарядом на i -й грани; \mathbf{E}_0 – амплитуда напряженности внешнего электрического поля;

S_i – площадь i -й грани, а неизвестными являются заряды граней q_i . Полученная система уравнений решается методом Гаусса.

Дипольный момент клетки вычисляется как сумма произведений зарядов на расстояние до центра граней из произвольной фиксированной точки. Найденное распределение зарядов позволяет определить напряженность электрического поля и ток в цитоплазме, мембране и в жидкости вблизи клетки. Заметим, что уравнения (6) и (7) можно использовать и для определения электрических полей для нейтральных и заряженных частиц сложной структуры. Распределение напряженности электрического поля и тока внутри клетки и в окружающей среде на различных частотах приведено на рис. 2.

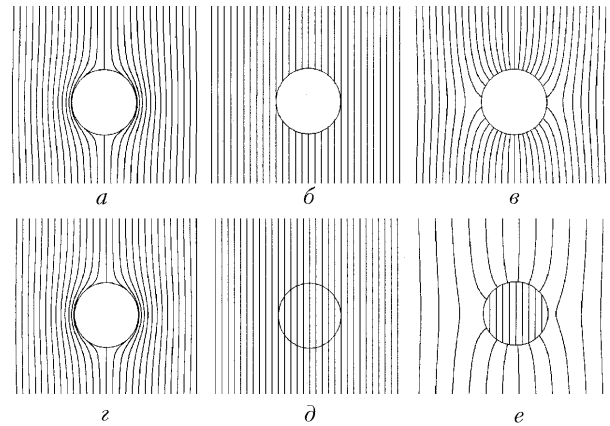


Рис. 2. Распределение напряженности электрического поля и тока внутри клетки и в окружающей среде: а, г – поле и ток на низкой частоте; б, д – поле и ток на равновесной частоте; в, е – поле и ток на высокой частоте

В частотном диапазоне от 0 до 10^7 Гц напряженность поля внутри клетки много меньше, чем в окружающей среде, что графически отражено на рис. 2 (отсутствуют силовые линии внутри клетки). Как видно из рис. 2, ток, проходящий внутри клетки, растет с увеличением частоты электрического поля. Этому соответствует различное направление силы, действующей на клетку в неоднородном поле на этих частотах.

Результаты и обсуждение

На основании решения прямой задачи по расчету электрических характеристик клетки с известными параметрами рассматривается решение обратной задачи – задачи восстановления параметров клетки на основе данных диэлектрофореза. Для этого разработана программа, с помощью которой можно рассчитать дипольный момент клетки с произвольной формой поверхности, которая учитывает диэлектрические проницаемости и проводимости среды и клетки. Результатом этой программы является определение зависимости коэффициента поляризуемости сферической клетки от частоты электрического поля.

На рис. 3 приведена типичная для клеток зависимость коэффициента поляризуемости от частоты переменного электрического поля. Весь диапазон частот разбит на пять областей, в которых качественно меняется зависимость коэффициента поляризуемости от характеристик цитоплазмы и мембраны.

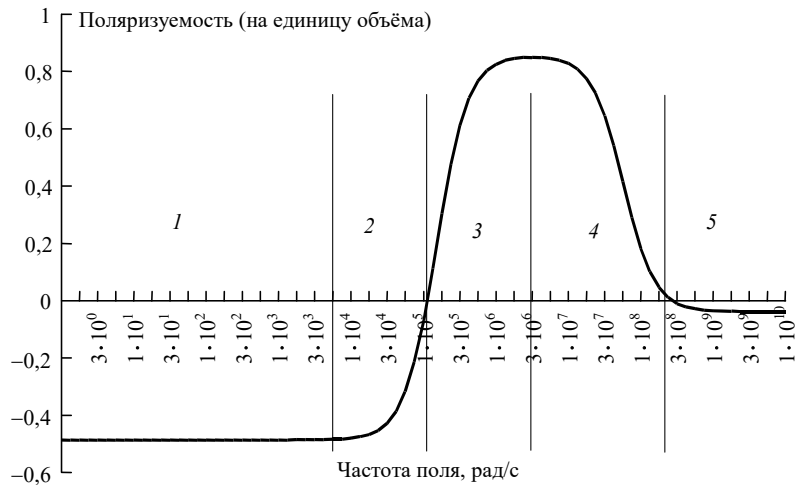


Рис. 3. Типичная для клеток зависимость реальной части поляризуемости от частоты переменного электрического поля. Параметры клетки: $\sigma_{\text{мем}} = 5 \cdot 10^{-7}$ СМ/М; $\epsilon_{\text{мем}} = 3\epsilon_0$; $\sigma_{\text{цит}} = 1,4$ СМ/М; $\epsilon_{\text{цит}} = 75\epsilon_0$; $\delta = 7$ нМ; $R = 3$ мкм; $\epsilon_{\text{ж}} = 81\epsilon_0$; $\sigma_{\text{ж}} = 0,017$ СМ/М

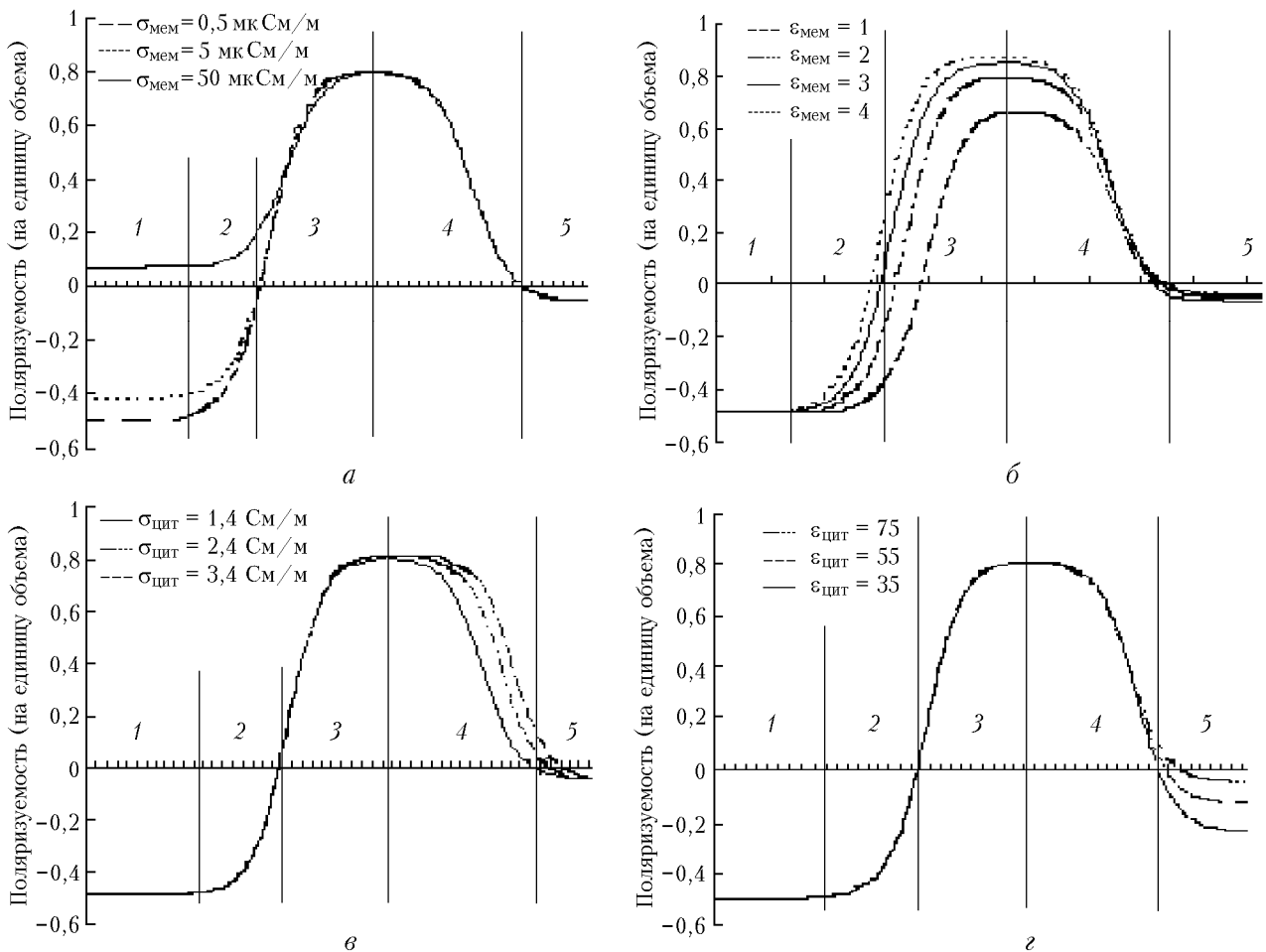


Рис. 4. Частотная зависимость поляризуемости на единицу объема для клеток с различными параметрами: *а* – с различной удельной проводимостью мембраны; *б* – с различной диэлектрической проницаемостью мембраны; *в* – с различной удельной проводимостью цитоплазмы; *г* – с различной диэлектрической проницаемостью цитоплазмы

На рис. 4, *а* приведена зависимость коэффициента поляризуемости клетки на единицу объема от проводимости мембраны и частоты электрического поля. Максимальные изменения коэффициента поляризуемости происходят

в первом частотном диапазоне. На рис. 4, *б* приведена частотная зависимость коэффициента поляризуемости на единицу объема для клеток с различной диэлектрической проницаемостью мембраны. На этом графике видно, что мак-

симальные изменения коэффициента поляризуемости происходят во втором и третьем диапазонах частот и по изменению коэффициента поляризуемости в этих диапазонах можно определить изменения диэлектрической проницаемости мембраны. На рис. 4, в приведена частотная зависимость коэффициента поляризуемости на единицу объема для клеток с разной удельной проводимостью цитоплазмы. Изменения этого параметра приводят к изменению коэффициента поляризуемости в 4-м частотном диапазоне. На рис. 4, з приведена частотная зависимость поляризуемости на единицу объема для клеток с разной диэлектрической проницаемостью цитоплазмы. Изменение диэлектрической проницаемости цитоплазмы отражается в изменении коэффициента поляризуемости в пятом частотном диапазоне. Максимальные изменения коэффициента поляризуемости при изменении характеристик отдельных структурных элементов клетки в различных диапазонах частот, полученные из анализа рис. 4, сведены в таблицу.

Максимальное изменение коэффициента поляризуемости клетки на единицу объема при изменении характеристик отдельных структурных элементов клетки в различных диапазонах частот

Характеристика	Коэффициент поляризуемости клетки на единицу объема				
	1-й	2-й	3-й	4-й	5-й
Изменение проводимости мембраны $\sigma_{\text{мем}}$, 0,5–50 мкСм/м	+0,6				
Изменение диэлектрической проницаемости мембраны $\epsilon_{\text{мем}}$, (1–4)		+0,4	+0,8		
Изменение проводимости цитоплазмы $\sigma_{\text{цит}}$, 1,4–3,4 мкСм/м				+0,4	
Изменение диэлектрической проницаемости цитоплазмы $\epsilon_{\text{цит}}$ (35–75)					+0,3

Из таблицы видно, что определение изменения характеристик отдельных структурных элементов клеток

возможно при измерении коэффициента поляризуемости клеток в различных диапазонах частот.

На основе экспериментальных данных взаимодействия частиц с электрическими полями создана библиотека видеоизображений движения различных классов микроорганизмов и клеток, полученных в электрическом поле в широком диапазоне частот при постоянном и периодическом воздействиях. Обработка видеоизображений позволяет тестировать решение прямой и обратной задач. В результате проведенных экспериментов определены равновесные первая (в области 50–500 кГц) и вторая (в области 50–300 МГц) частоты. Изменения характеристик цитоплазмы существенно изменяют положение второй равновесной частоты. Эти изменения могут быть связаны с размножением вирусов в клетке или переходом клеток в спорную форму.

Выводы

Показано, что можно независимо определить диэлектрические проницаемости и проводимости цитоплазмы и мембраны по результатам измерения поляризуемости клетки в частотном диапазоне от 0 до 10^9 Гц.

Разработана программа, с помощью которой можно находить электрические характеристики заряженных и нейтральных частиц произвольной формы в постоянных и переменных электрических полях в жидкости и в воздухе.

1. *Топорков В.С., Бакиров Т.С., Генералов В.М., Сафатов В.С.* Отбор биологических частиц в верхних слоях атмосферы // Оптика атмосф. и океана. 1999. Т. 12. № 6. С. 549–552.
2. *Бакиров Т.С., Генералов В.М.* Проботборник «Ловушка» для частиц биогенного происхождения в космосе // Оптика атмосф. и океана. 2000. Т. 13. № 6–7. С. 598–602.
3. *А.с. 1642353 СССР МКИ G 01 № 27/22.* Способ определения поляризационных характеристик частиц / Т.С. Бакиров, В.М. Генералов, В.М. Чермашенцев. Оpubл. в БИ, 1991. № 14.
4. *Пат. 2105815 СССР, МКИ 6 С 12 Q 1/00.* Оpubл. в БИ, 1998. № 6.
5. *Исмаилов Э.Ш.* Биофизическое действие СВЧ-излучений. М.: Энергоатомиздат, 1987. 200 с.
6. *Пастушенко В.Ф., Кузьмин П.И., Чизмаджев Ю.А.* Диэлектрофорез и электровращение клеток: единая теория для сферически симметричных клеток с произвольной структурой мембраны // Биологические мембраны. 1988. Т. 5. № 1 С. 65–78.

T.S. Bakirov, V.S. Generalov, O.V. Fefelov. The solution of the problem of electrical fields interaction with biogenic particles.

The problem of sampling, separation and identification of biogenic particles in high atmospheric layers and in space is of great scientific interest and can be resolved using high frequency electrical and magnetic fields. The goal of the present activity is the solution of direct and inverse problems of interaction of electrical fields with biogenic particles. As the result of the solution of the direct problem, the electrical dipole moment and polarizability of particles, speed of the particles in a liquid or in air in an external electrical field is determined in a broad band of frequencies. The solution of the inverse problem is in determination of the structure and basic electrical characteristics (conductivity and permittivity of cytoplasm and membrane) of biological particles by measurements of speed of the particles in a liquid or in air at different frequencies of an electrical field.