

© 1994 г. КРАСИЛЬНИКОВ П.М., ФИСУН О.И.

**СОБСТВЕННЫЕ КОЛЕБАНИЯ ЗАРЯЖЕННЫХ СФЕРИЧЕСКИХ
МЕМБРАН**

Теоретически исследовано влияние поверхностного заряда мембран на спектр собственных колебаний клеток. Показано, что у сильно заряженных клеток могут возбуждаться собственные упругие колебания в диапазоне частот $\sim 10^{10} \text{ с}^{-1}$.

Многие вопросы биофизики мембран связаны с исследованием их механических свойств [1,2]. Важной характеристикой биологических мембран является спектр собственных колебаний, который, как правило, описывается при условии их электронейтральности [3]. Между тем известно, что многие биомембраны представляют собой заряженные системы, в связи с чем в данной работе изучено влияние заряда мембраны на спектр ее упругих колебаний.

Рассмотрим сферическую везикулу радиуса a , оболочка которой представляет собой бислойную липидную мембрану толщиной $h \ll a$ (оболочечная модель клетки). Электрический заряд q мембраны определяют полярные «головки» липидных молекул, выстилающие обе ее поверхности. Внутри и снаружи везикулы находится раствор электролита, ионы которого формируют двойной электрический слой у обеих поверхностей мембраны.

Задача о собственных колебаниях мембраны, как известно, сводится к решению уравнений движения вязкой жидкости, где в качестве граничных условий используются уравнения движения упругой оболочки. Жидкости внутри и снаружи везикулы описываются полями скоростей $V(r,t)$, плотности $\rho(r,t)$ и давления $p(r,t)$, которые связаны между собой уравнениями непрерывности

$$\partial\rho/\partial t + \text{div}(\rho V) = 0,$$

движения (уравнение Навье-Стокса)

$$\rho(\partial V/\partial t + (V\nabla)V) = -\nabla p + \eta\nabla^2 V + (\zeta + \eta/3)\text{grad div} V$$

и состояния

$$p = p(\rho)$$

(ζ и η – коэффициенты объемной и сдвиговой вязкости). Скорость жидкости на границе совпадает со скоростью движения мембраны

$$\vec{V}_i|_{r=a} = \vec{V}_e|_{r=a} = du/dt$$

где \vec{u} – вектор смещения поверхности оболочки, i и e – индексы, обозначающие внутреннюю и внешнюю области везикулы. Ограничиваясь рассмотрением аксиально симметричных колебаний мембраны, уравнения движения ее срединной поверхности в сферической системе координат r, θ, ϕ представим в виде [3,4]