

УДК 577.3

К ВОПРОСУ О ФОРМЕ ЭРИТРОЦИТА

М. В. Фок, Г. А. Прокопенко, Р. М. Зарицкий

Предпринята попытка объяснения формы эритроцита на основе учета как упругих свойств его мембраны, так и электростатического взаимодействия ее молекул.

Эритроцит имеет форму, которая может быть получена вращением кривой, изображенной на рис. 1, вокруг вертикальной оси симметрии. В дальнейшем будем называть такую форму дискоцитом. Известно, что, в отличие от других клеток, внутри эритроцита нет никаких твердых структур (клеточных органелл), и считается, что его форма объясняется упругими свойствами его мембраны, которая ограничивает цитоплазму эритроцита от внешней среды. Эта точка зрения настолько распространена, что даже попала в научно-популярные журналы [1]. Однако, эта точка зрения не учитывает специфического строения мембраны, на внешней стороне которой дипольные головки липидов наклонены к поверхности мембраны, в то время как на внутренней стороне они ориентированы почти по нормали к поверхности [2] (рис. 2). Поэтому на внешней стороне мембраны положительно заряженный конец дипольной головки притягивается к отрицательно заряженному основанию соседней. На внутренней стороне над этим притяжением преобладает отталкивание соседних одноименных зарядов, поэтому дипольные головки отталкиваются друг от друга, стремясь как бы вывернуть эритроцит наизнанку.

Известно, что гуковская энергия деформации ($E_{гук}$) замкнутой упругой пленки Σ определяется интегралом $\int_{\Sigma} (k_1^2 + k_2^2) d\sigma$, где k_1 и k_2 – главные кривизны на элементе поверхности $d\sigma$. Учитывая описанную выше несимметричную дипольную структуру мембраны, а также принимая во внимание возможное наличие на внутренней стороне мембраны нескомпенсированных фиксированных зарядов одного знака, к гуковской энергии деформации ($E_{гук}$) следует добавить электростатическую энергию $E_{эл}$, отсчитываемую от энергии плоской мембраны. Тогда полная энергия элементарного участка с точностью до множителя будет равна

$$E(d\sigma) = E_{\text{эук}}(d\sigma) + cE_{\text{эл}}(d\sigma), \quad (1)$$

где

$$E_{\text{эл}}(d\sigma) = (k_1 + k_2)d\sigma, \quad (2)$$

а c – неизвестная константа.

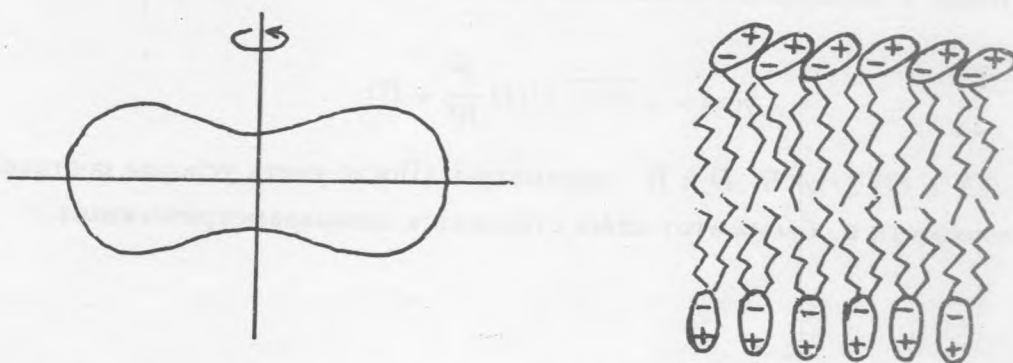


Рис. 1. Форма эритроцита (дискоцит).

Рис. 2. Липидная часть мембраны эритроцита. На внешней стороне (вверху) дипольные головки молекул липидов "лежат", а на внутренней – "стоят".

Решение системы уравнений динамического равновесия ионов внутри и снаружи эритроцита при фиксированных параметрах системы (таких как средние концентрации ионов в крови, проницаемость мембраны, скорость работы ионных насосов и др.) однозначно определяет объем эритроцита V . Площадь поверхности эритроцита S тоже постоянна, так как его мембрана практически нерастяжима.

Таким образом, задача сводится к минимизации функционала

$$\int_{\Sigma} \{k_1^2 + k_2^2\} + c(k_1 + k_2) d\sigma \quad (3)$$

с условиями

$$\begin{cases} V = V_0 \\ S = S_0, \end{cases} \quad (4)$$

$$E_{2yк}(\alpha) = \int_{\Sigma_\alpha} (k_1^2 + k_2^2) d\sigma \quad (6)$$

и

$$E_{3а}(\alpha) = \int_{\Sigma_\alpha} (k_1^2 + k_2^2) d\sigma \quad (7)$$

как функции от некоторого параметра α , задающего поверхность в Γ (рис. 3), а затем исследовали их линейную комбинацию.

Из рис. 3 видно, что по крайней мере в рассматриваемом классе поверхностей Γ форма дискоцита соответствует не только локальному минимуму гуковской энергии (что согласуется с [4]), но и абсолютному. Дискоцит обладает также и минимальной смешанной энергией (т.е. энергией типа (1)) для широкого класса положительных констант c . Причем, добавление $E_{3а}$ с некоторой $c > 0$ практически не меняет форму дискоцита, отвечающую минимуму энергии, но делает этот минимум еще глубже по сравнению с энергией гантели (вторым локальным минимумом). Это объясняет устойчивость формы дискоцита.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Маркин В. С. Химия и жизнь, N 8, 10 (1985).
- [2] Фок М. В., Зарицкий А. Р., Прокопенко Г. А., Грачев В. И. Препринт ФИАН N 51, М., 1991.
- [3] Драшусов В. О кривизне поверхностей около каждой их точки. Москва, 1838.
- [4] Peterson M. A. Phys. Rev., A45, 4117 (1991).

Поступила в редакцию 16 июня 1994 г.