

# БИОЛОГИЧЕСКАЯ ЭЛЕКТРОМЕХАНИКА

М.В. Чашко

Донецкий национальный технический университет  
Кафедра ЭМиТОЭ, ДНТУ, ул. Артема 58, г. Донецк, 83000, Украина  
Тел. моб.: 80504743874, E-mail: mark@pautina.dn.ua

**Annotation** - Technology of electromechanical transformation of the energy, used by the nature for electrification of ability to live of alive organisms

**Key words** - bio-energetics, bioelectricity

## ВВЕДЕНИЕ

Работа посвящена преобразованию энергии в живых организмах.

А к т у а л ь н о с т ь обусловлена необходимостью сохранить на планете стабильность уровня энергии, к которому приспособлена окружающая человека среда. Эту стабильность обеспечивает биологическое преобразование энергии.

С о с т о я н и е в о п р о с а . В настоящее время для получения электрической энергии используются источники, в которых энергия накоплена в течение миллионов лет – нефть, уголь. Эта энергия, в конечном счете, переходит в тепловую и добавляется к потоку солнечной. В результате количество энергии, поступающее в окружающую человека среду, выше уровня, к которому эта среда приспособлена, что приводит к ее изменению. Ситуация подобна той, которая возникнет, если к нагрузке, питающейся от стабильного источника электроэнергии, подключить предварительно заряженный конденсатор. Очевидно, что атомная энергетика не решает, а усугубляет проблему.

Разрешением противоречия между потребностью человечества в электроэнергии и недопустимостью использования энергии аккумуляционной является превращение в электрическую энергию, к которой природа приспособлена – солнечной, гравитации и т.п. Все живые организмы создают, передают и используют электроэнергию в процессе своей жизнедеятельности, технологии, которые при этом используются, исследованы биофизиками в последние десятилетия.

Ц е л ь данной работы – оценить энергетические параметры, а также внешние и регулировочные характеристики способов, которыми в живой природе электрическая энергия создается и преобразуется в механическую.

## СОДЕРЖАНИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

Г е н е р а ц и я э л е к т р и ч е с т в а происходит в мембране клетки, которая отделяет внутреннюю жидкость клетки от наружной. Мембрана состоит из жировых молекул и пронизана порами (каналами) из белковых молекул. Жидкость внутри и снаружи мембраны содержит ионы. К о н ц е н т р а ц и я и о н о в п о р а з н ы е с т о р о н ы м е м б р а н ы р а з л и ч н а (Рис.1).

Под действием механических сил, обусловленных разностью концентраций, ионы сквозь поры (каналы) пересекают мембрану и сосредоточиваются на поверхности с одной ее стороны, создавая электрический потенциал. В результате мембрана

представляет собой заряженный конденсатор, содержащий энергию электрического поля.

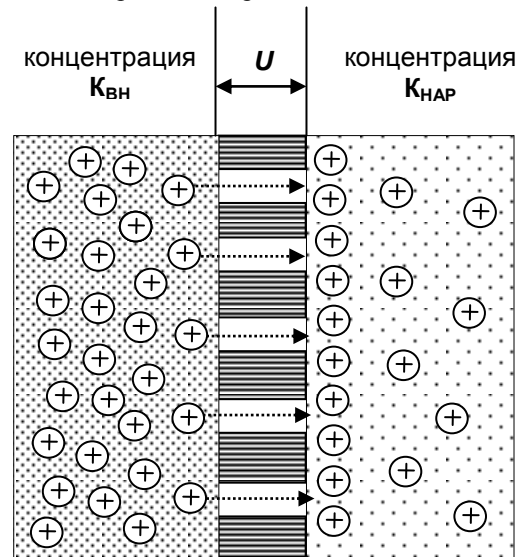


Рис.1. Разность концентраций ионов  $K_{ВН}$ ,  $K_{НАР}$  создает электрический потенциал  $U$ .

Канал действует как ключ: он или открыт в данное время для иона данного размера, тогда ион проходит без трения. Или закрыт, тогда ток отсутствует. Поэтому образование потенциала происходит без затрат энергии, заряды перемещаются по градиенту концентрации и без сопротивления.

Разность потенциалов между сторонами мембраны, обусловленная разностью концентраций ионов,

$$U = 0.06 \lg \frac{K_{НАР}}{K_{ВН}}, \quad (1)$$

$K_{НАР}$ ,  $K_{ВН}$  – концентрации ионов на наружной и внутренней сторонах мембраны.

Отношение концентраций ионов в живой клетке ориентировочно 50, так что разность потенциалов составляет около 0,1 В.

Мембрана представляет собой конденсатор емкостью  $C \cong 10^{-2} \text{ Ф/м}^2$  [1, с.71]. Можно определить, что при указанной разности потенциалов количество энергии, запасенное в электрическом поле мембраны,

$$w_s = 0,5CU^2 = 5 \cdot 10^{-5} \text{ Дж/м}^2. \quad (2)$$

Толщина биоэлектрического элемента, способного поддерживать потенциал без значимого изменения концентрации в течение суток, составляет  $\Delta=0,05$  мм. Сюда входит толщина мембраны и

внутренний и наружный слои жидкости, насыщенные ионами. Плотность жидкости  $\rho$  около  $1000 \text{ кг/м}^3$ . Отсюда следует, что плотность запасенной в мембране энергии составляет

$$w_V = \frac{w_S}{\Delta} = 1 \text{ Дж/м}^3, \quad (3)$$

$$w_G = w_V / \rho = 10^{-3} \text{ Дж/кг}. \quad (4)$$

Длительность цикла заряда – разряда мембраны-конденсатора, минимально допустимая мембраной,  $T=10^{-6}$  с, откуда следует, что удельные мощности мембраны – генератора

$$p_S = w_S / T = 5 \cdot 10^{-5} / 10^{-6} = 50 \text{ Вт/м}^2. \quad (5)$$

Для сравнения плотность потока мощности современного солнечного элемента имеет порядок  $100 \text{ Вт/м}^2$ , поток ветра при скорости  $10 \text{ м/с}$  имеет такую же плотность мощности. Плотность мощности тепловой или атомной станции как мощность, разделенная на площадь поверхности, занимаемой станцией, на порядок выше.

Удельная на единицу объема мощность биологического электрогенератора

$$p_V = w_V / T = 10^6 \text{ Вт/м}^3. \quad (6)$$

У турбогенераторов порядок этой величины –  $10^3 \text{ Вт/м}^3$ , т.е. на три порядка ниже.

Удельная на единицу массы мощность биологического электрогенератора

$$p_G = w_G / T = 10^3 \text{ Вт/кг}. \quad (7)$$

У турбогенераторов –  $0,1 \text{ кВт/кг}$ .

Из сравнения следует, что удельные энергетические параметры мембраны живой клетки как генератора энергии на несколько порядков превосходят параметры «человеческих» электрогенераторов.

Причина этого, по мнению автора, в том, что технология создания электрического потенциала в живой клетке не связана с магнитным полем. Электрогенераторы же, применяемые в технике, используют магнитное поле как основу для электромеханического преобразования энергии. А магнитное поле материалоемко и энергоемко.

Внешняя характеристика биологического электрогенератора определяется его внутренним сопротивлением. Собственно, сопротивление как таковое отсутствует: в мембране ионы проходят по каналам без трения. Но отбор мощности может происходить только дискретно: на восстановление разности потенциалов требуется отрезок времени порядка  $1 \text{ мкс}$ . Поэтому максимально возможная плотность тока от мембраны равна количеству электричества, разделенному на значение дискреты:

$$j = CU/T = 2 \cdot 10^{-2} \cdot 0,1 / 10^{-6} = 2000 \text{ А/м}^2. \quad (8)$$

Соответственно, «внутреннее сопротивление» генератора

$$r = U/j = 0,1/2000 = 5 \cdot 10^{-5} \text{ Ом}\cdot\text{м}. \quad (9)$$

Регулировочной характеристикой биоэлектрического генератора названа зависимость разности потенциалов  $U$  от соотношения концентраций ионов на внутренней и внешней сторонах биологической мембраны. Эта зависимость представлена формулой (1). Характеристики генератора представлены на рис. 2. Из графиков следует, что внешняя характеристика генератора мягкая: при плотности тока  $300 \text{ А/м}^2$ , который можно считать номинальным [2], падение напряжения на генераторе составляет 15%.

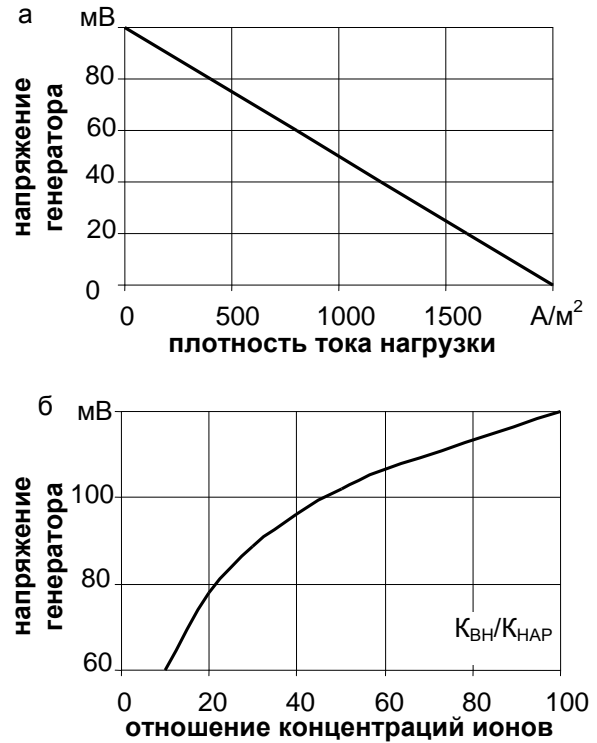


Рис.2. Характеристики биологического электрогенератора, а – внешняя, б – регулировочная.

Регулировочная характеристика носит информативный характер: при проектировании искусственного устройства на принципе биологического электрогенератора следует знать, что разность потенциалов на мембране возрастает приблизительно на  $0,05 \text{ В}$  при возрастании концентрации ионов в  $10$  раз.

Преобразование электрической энергии в механическую также происходит в мембране клетки. Биологический электромеханический преобразователь (рис. 3) содержит мембрану с каналами, диаметры которых равны или несколько больше диаметра иона. На поверхностях внешней и внутренней (по отношению к клетке, которую охватывает мембрана,) мембраны сосредоточены ионы – калия, натрия, водорода, хлора – в разной концентрации, так что имеет место разность потенциалов  $U$ . Эта мембрана является «статором» привода. «Ротором» является белковая молекула, выступы которой расположены в каналах.

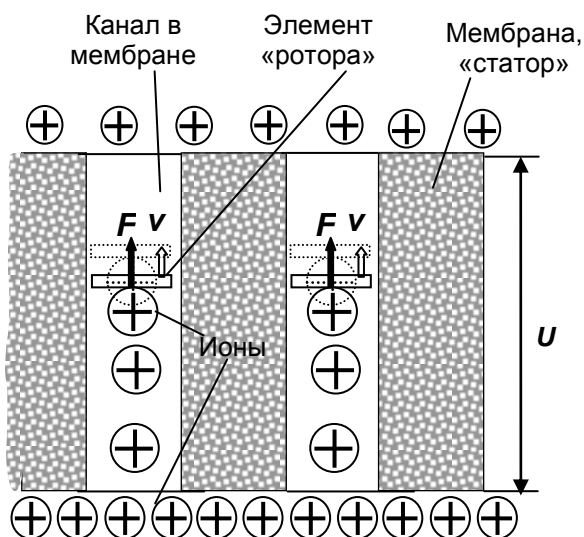


Рис.3. Схема преобразования энергии разности электрических потенциалов в механическую энергию перемещения «ротора».

Под действием разности потенциалов ионы без трения перемещаются по каналам, взаимодействуя с выступами «ротора», т.е. давят на него с силой  $F$ . Под действием этой силы выступ перемещается со скоростью  $v$  в течение времени  $t$ . Так происходит преобразование энергии электрического потенциала  $U$  в механическую энергию  $Fvt$ .

Плотность тока на расстояниях, не больших длины свободного пробега зарядов, определяется законом Ленгмюра [3, с.422]:

$$j = \frac{4\sqrt{2e\epsilon_0}}{9} \cdot \frac{U^{1.5}}{l^2\sqrt{m}}, \quad (10)$$

где  $j$  – плотность тока,  $A/m^2$ ;  $e$  – заряд иона,  $1,6 \cdot 10^{-19}$  Кл, А·с;  $\epsilon_0$  – электрическая постоянная,  $8,85 \cdot 10^{-12}$  Ф/м;  $l$  – расстояние между поверхностями с разностью потенциалов  $U$ . У бактерий порядок этой величины  $10^{-8}$  м;  $m$  – масса иона: протона (атома водорода,  $H^+$ ) –  $1,67 \cdot 10^{-24}$  г, натрия  $Na^+$  –  $38,2 \cdot 10^{-24}$  г, калия  $K^+$  –  $64,9 \cdot 10^{-24}$  г.

После подстановки значений постоянных величин ( $\epsilon_0$ ,  $e$ ,  $m_{пр}$ )

$$j \approx 1,7 \cdot 10^{-9} \frac{U^{1.5}}{l^2} \sqrt{\frac{m_{пр}}{m_H}}. \quad (11)$$

$m_H$  – масса иона,  $m_{пр}$  – масса протона.

Механическая характеристика биологического электродвигателя определяется из уравнений:

$$0,5\rho_H v^2 = f, \quad (12)$$

$$\rho_H v = j_H. \quad (13)$$

В них обозначено  $\rho_H$  – плотность ионов,  $г/м^3$ ;  $v$  – скорость ионов,  $м/с$ ;  $f$  – давление потока ионов на «ротор»,  $Н/м^2$ ;  $j_H$  – плотность тока,  $г/(с \cdot м^2)$ .

Из этих уравнений следует

$$f = 0,5j_H(v_H - v_P), \quad (14)$$

где  $v_H$  – скорость ионов,  $v_P$  – скорость «ротора».

Плотность тока ионов как частиц, обладающих массой  $j_H$ , получается из выражения для плотности тока зарядов (11), делением на значение элементарного заряда  $e$  и умножением на массу иона:

$$j_H = jm_H/e \approx 1,7 \cdot 10^{-9} \frac{U^{1.5}}{l^2 e} \sqrt{m_{пр}m_H}. \quad (15)$$

Скорость ионов

$$v_H = \sqrt{\frac{Ue}{2m_{пр}}}. \quad (16)$$

На основании уравнений (14) – (16)

$$f = 1,5E^2 s \sqrt{m_H}, \quad (17)$$

где  $E=U/l$ ,

$$s = \frac{v_H - v_P}{v_H}. \quad (18)$$

На рис. 4 представлены внешняя  $v_P(f)$  и регулировочная  $f(E)$  характеристики биологического электродвигателя бактерии, где «рабочим телом» является поток протонов ( $m_H = m_{пр}$ ).

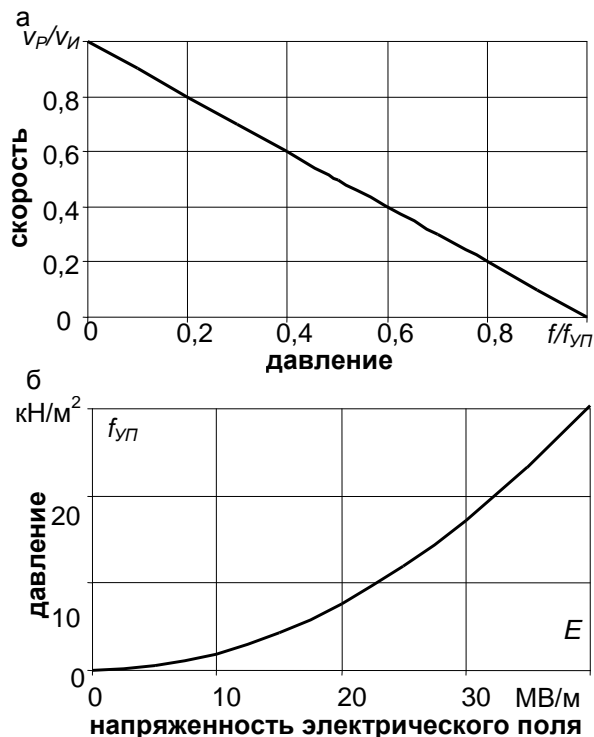


Рис. 4. Характеристики биологического электродвигателя: а – внешняя, б - регулировочная.

Графики иллюстрируют снижение скорости пропорционально увеличению давления, и увеличе-

вления пропорционально квадрату напряженности электрического поля.

Мощность на единицу площади сечения потока ионов, Вт/м<sup>2</sup>, из формул (16) и (17)

$$p = f v_{II} = 4,25 \cdot 10^{-10} \frac{U^{2,5}}{l^2} s \sqrt{\frac{m_{II}}{m_{IP}}}. \quad (19)$$

Для электродвигателя биологического порядок этой величины 10<sup>4</sup> Вт/м<sup>2</sup>. В традиционных электродвигателях этот параметр имеет порядок 10<sup>6</sup> Вт/м<sup>2</sup>. Но биологические электродвигатели имеют преимущество на несколько порядков по мощности на единицу массы и объема.

Причина этого следующая. Мощность электро-механического преобразователя определяется скоростью преобразования и объемом энергии в области преобразования. Скорости у обоих одного порядка (10 – 10<sup>2</sup> м/с). Количество энергии в воздушном зазоре традиционного электро-механического преобразователя при индукции в зазоре В=1 Т

$$w_M = 0,5 B^2 / \mu_0 \cong 4 \cdot 10^5 \text{ Дж/м}^3.$$

В биологическом преобразователе при напряженности электрического поля  $E = 3 \cdot 10^7$

$$w_3 = 0,5 \varepsilon_0 E^2 \cong 4 \cdot 10^3 \text{ Дж/м}^3,$$

но объем магнитопровода и обмотки «железной» электрической машины приблизительно на три порядка больше, чем объем ее воздушного зазора.

В биологическом преобразователе толщина объема ионов, создающих напряженность  $E$ , на порядок меньше самого зазора, так что его объем практически равен объему пространства, где происходит преобразование энергии.

Из приведенного следует вывод: в принципе, в биологических электро-механических преобразователях удельная на единицу объема мощность (Вт/м<sup>3</sup>) в 10 раз больше, чем в традиционных электрических машинах. Соответственно, удельная на единицу массы мощность (Вт/кг) больше в 100 раз.

Приведенные выше оценки сделаны на основании допущений: толщина магнитопровода приблизительно равна длине полюса вдоль направления вращения; концентрация ионов в биологических преобразователях  $\rho_e = 3 \cdot 10^5$  Кл/м<sup>3</sup> [4, с. 59], так что для создания напряженности  $E = 3 \cdot 10^7$  необходима толщина слоя зарядов  $h \approx 10^9$ .

Еще одной особенностью биологических преобразователей является высокая энергетическая эффективность: КПД их практически 100% [5]. Это обусловлено тем, что преобразование энергии про-

исходит на расстояниях, меньших длины свободного пробега ионов. Вследствие этого ионы перемещаются по каналам мембраны без трения, в отличие от перемещения электронов в проводнике или ионов в растворе – рассеяния энергии не происходит.

Возникает желание получить преобразователь в макромасштабах с такими же высокими массогабаритными и энергетическими параметрами, что и преобразователи биологические. Представляется, что это возможно в условиях космоса: плотность вещества в космосе 10<sup>-24</sup> г/см<sup>3</sup>, масса иона  $\approx 10^{-23}$  г, следовательно, на одну частицу приходится 10 см<sup>3</sup> пространства и ориентировочная длина свободного пробега составляет около 2 см.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Технология электро-механического преобразования энергии, используемая природой для электрификации жизнедеятельности живых организмов, построена на использовании электрического, а не магнитного или электромагнитного поля. Особенности этой технологии:

- высокий (близкий 100%) КПД, обусловленный протеканием процессов преобразования на расстояниях, меньших длины свободного пробега ионов;

- низкая по сравнению с электрическими машинами, созданными человеком, плотность потока мощности (на 2 – 3 порядка);

- более высокая (на 1–3 порядка) удельная мощностью на единицу массы и объема.

Эти свойства обусловлены использованием в биоэлектрических преобразователях электрического, а не магнитного поля.

Биологические технологии электро-механического преобразования могут быть применены в макроустройствах в условиях космического пространства, где длина свободного пробега составляет сантиметры, а не десятки нанометров, как в мембране живой клетки.

[1] Биофизика: Учебник для вузов/ В.Ф.Антонов, А.М.Черныш, В.И.Пасечник, С.А.Вознесенский, Е.К.Козлова; Под ред. В.Ф.Антонова.-М.: ВЛАДОС, 2000, 288 с.

[2] Чашко М.В. Биологический электрогенератор. Технічна електродинаміка.-Тематичний випуск «Силова електроніка та енергоефективність» / Частина 4.- С.62 .

[3]. Яворский Б.М., Детлаф А.А. Справочник по физике.- М.: «Наука»,- 1968.-940 с.

[4] Плонси Р, Барр Р., Биоэлектричество: Количественный подход. – М.: Мир, 1992, 366 с.

[5] Тихонов А.Н. Молекулярные моторы. <http://nature.web.ru/db/msg.html?mid=1159126>