



БЕЛКОВЫЕ НАНОГЕНЕРАТОРЫ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ ЖИВОЙ КЛЕТКИ – ПРООБРАЗ ПРИРОДОПОДОБНОЙ "ЗЕЛеной" НАНОЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКИ

PROTEIN NANOGENERATORS OF THE LIVING CELL ELECTRICITY AS THE PROTOTYPE OF THE NATURE-LIKE "GREEN" NANOELECTRIC ENERGETICS

М.А.Сидоров, Российская академия естественных наук, Европейская академия естественных наук (Ганновер, ФРГ)
M.A.Sidorov, Russian Academy of Natural Sciences, European Academy of Natural Sciences (Hannover, Germany)

DOI: 10.22184/1993-8578.2021.14.3-4.174.183

Получено: 18.05.2021 г.

Белковые генераторы электроэнергии – наноразмерные ферментные комплексы электронно-транспортных цепей (ЭТЦ) мембран растительных и животных клеток. На основе конвергенции биоэнергетики и нанотехнологий проведены фундаментальные теоретические исследования свойств таких белковых электрогенераторов (асимметричных, потенциальных, энергетических нанобиобарьеров – наногетероструктур), в результате которых были созданы нанобиоэлектрофизическая, нанобиотеплоэнергетическая и квантово-волновая математическая модели механизма их работы в ЭТЦ. Создание таких моделей, а также конвергентных нанотехнологий и наногетероструктур, возможно, позволит построить системы генерации, хранения и использования электроэнергии нового поколения, сравнимые по эффективности с природными организмами.

Protein generators of electricity are nanosized enzymatic complexes of electron transport chains (ETC) of membranes of plant and animal cells. On the basis of the convergence of bioenergy and nanotechnology, fundamental theoretical studies of the properties of these protein electric generators (asymmetric, potential, energy nanobiobarriers – nanoheterostructures) have been carried out, as a result of which nanobioelectrophysical, nanobioheat-energy and quantum-wave mathematical models of the mechanism (technology) of their operation in the ETC have been created. The creation of such models, as well as convergent nanotechnologies and nanoheterostructures, will probably make it possible to build systems for generating, storing and using the new generation of electricity, comparable in efficiency with natural organisms.

ВВЕДЕНИЕ

Преобразование возобновляемых источников энергии (ВИЭ) в электроэнергию

Нестабильность производств электроэнергии с использованием возобновляемых энергий ветра и излучения Солнца и сравнительно низкая их эффективность, как и термоэлектрических генераторов [1], преобразующих неиспользуемую на производствах и рассеивающуюся в пространстве высокотемпературную тепловую энергию в электрический ток, требует поиска и создания новых видов выработки электроэнергии, использующих ВИЭ, но более эффективных, гибридных, использующих

природоподобные технологии получения и накопления электроэнергии. Одной из них могла бы стать технология преобразования рассеянной в окружающей нас среде энергии, возобновляемой Солнцем, а также "пополняемой" деятельностью человека, низкопотенциальной тепловой энергии в энергию электрическую в гигантских количествах.

Идея преобразования низкопотенциальной тепловой энергии в электрическую на основе глубокого изучения электронной теории в приложении к биоэнергетике

К.Э. Циолковский видел решение "проблемы полного перехода тепловой энергии в электрическую



со стопроцентным коэффициентом преобразования" в глубоком изучении электронной теории, и, особенно, в ее приложении к биологическим процессам [2]. В Электрофизической лаборатории Академии наук СССР под руководством выдающегося ученого, организатора науки и изобретателя, профессора П.К.Ощепкова (1908–1992) был впервые запущен теоретический и экспериментальный поиск в применении к электронной теории (квантово-волновой механике) и микроэлектронике [3] решения актуальной и сегодня проблемы концентрации, преобразования и использования рассеянной в гигантских количествах в окружающей нас среде, возобновляемой солнцем ("чистой") и деятельностью человека ("грязной"), низкопотенциальной тепловой энергии в электрическую. Поиск же решения этой проблемы в приложении к биотехнологиям и конструкциям живой клетки профессор П.К.Ощепков оставил нынешним поколениям исследователей, в том числе своим ученикам и соратникам.

Поиск и моделирование механизма биогенерации электроэнергии клетками

Несмотря на активность исследований биоэнергетики клеток, многие механизмы работы белковых электрогенераторов ЭТЦ мембран и свойства их отдельных компонентов во многом остаются загадкой. Намечались разные пути исследований биогенерации электроэнергии клетками растений и животных и их моделирование. В одном случае – это копирование: разобрать по молекулам и смоделировать с их помощью, например, биоэлектроэнергетику клеток рыбы-угря. Такую задачу поставили перед собой биоэнергетики Национального института стандартов и технологий (США).

На основе такого копирования предстояло разработать математическую модель функционирования электрических клеток угря, и на ее основе создать искусственные клетки. При соединении их последовательно и укладке в объем куба со стороной чуть более четырех миллиметров ожидается, что такие структуры будут способны производить электрический ток мощностью около 300 мкВт, достаточный для работы миниатюрных электронных устройств. Предполагается, что эти искусственные клетки используют способность молекул адезинтрифосфата (АТФ) преобразовывать, при определенных условиях, химическую энергию в электрическую [4]. Второй путь – разработать новые

подходы к теоретическому исследованию и раскрытию природы механизма биогенерации электроэнергии клетками растений и животных, провести в дальнейшем моделирование и на этой основе, предположительно, создать принципиально новую, природоподобную технологию генерации электроэнергии.

Основные процессы в биоэнергетике клеток растений и животных имеют много общего: главное – они зависят от работы электронно-транспортных цепей (ЭТЦ) каталитических ферментных комплексов (белковых генераторов электроэнергии), погруженных в "дыхательные" цепи внутренних мембран митохондрий клеток животных и мембраны хлоропластов клеток растений [5].

Еще одной общей чертой является то, что, в соответствии с хемиосмотической гипотезой П.Митчелла, в этих мембранах АТФ-синтеза используется производимая белковыми генераторами ЭТЦ электрическая энергия для синтеза АТФ из АДФ и фосфата [6]. Белковые генераторы электрической энергии (белковые ферментные комплексы) последовательно (как обычные электрические батарейки) соединены друг с другом и входят в состав ЭТЦ мембран митохондрий и хлоропластов клеток. Любой из этих ферментных комплексов (белковых электрогенераторов) может быть отделен от других без потери своих исходных электрических свойств [7]. Эти электрогенераторы ЭТЦ в результате последовательного, циклически действующего [8] динамического переноса электронов по замкнутой цепи, сопряженного с перекачкой протонов через мембрану, не только производят электроэнергию, но и позволяют, благодаря этой перекачке, запастись ее в виде трансмембранного протонного потенциала на мембране хлоропластов или внутренней мембране митохондрий.

Таким образом, белковые электрогенераторы участвуют в создании потока электронов в ЭТЦ – электрического тока, энергия которого преобразуется в химическую энергию (АТФ). Транспорт электронов с помощью их переносчиков – белковых электрогенераторов ЭТЦ, происходит циклически, "самопроизвольно", ступенчато, в несколько этапов, с потерей электронами энергии в виде поступающего в межмембранное пространство клеток протона (H⁺) при прохождении белковых электрогенераторов. Существует определенная закономерность в последовательности этого переноса: электроны поступают от донора (переносчика) с отрицательным



потенциалом к акцептору с положительным потенциалом.

Тепловая энергия – необходимый участник процессов в биоэнергетике клеток растений. Ранее считалось, что при интенсивном процессе только 0,5–5% солнечной энергии расходуется собственно на фотосинтез клеток растений, в то время как около 95% этой энергии преобразуется в тепловую энергию и передается окружающей среде. В то же время известно, что при слабом освещении эффективность фотосинтеза почти на порядок выше, чем при интенсивном. Этот парадокс объяснили тем, что при фотосинтезе источником кислорода (водорода) является не вода, а экзо- и эндогенный пероксид водорода. В связи с этим, была предложена новая концепция фотосинтеза клеток растений, которые представляют собой организм, стремящийся к активному поглощению диоксида углерода и пероксида водорода.

Разложение пероксида водорода, с выделением молекулярного кислорода, возможно по фотоэлектрохимическому или (и) термохимическому механизму. Это означает, что тепловая энергия не только существенный, но и необходимый участник фотосинтетического процесса.

При больших интенсивностях света растительная клетка отдает тепловую энергию окружающей среде, при малых же интенсивностях света она отбирает, "перекачивает", подобно "тепловому насосу", низкопотенциальную (на уровне биологических температур) тепловую энергию из окружающей среды. Возможно, что при слабом освещении, с учетом вклада низкопотенциальной тепловой энергии, коэффициент преобразования солнечной энергии в разделение зарядов и создание разности электрических потенциалов на биокомплексах (белковых электрогенераторах) ЭТЦ растительной клетки, который обычно составляет 100%, может быть даже больше [9].

Таким образом, белковые электрогенераторы ЭТЦ мембран хлоропластов клеток растений, которые обычно преобразуют энергию солнечного излучения в электрический ток, при нехватке энергии этого излучения еще и "перекачивают" ее с помощью перекиси водорода, разложение которого с выделением молекулярного кислорода идет термохимически, в низкопотенциальную, возобновляемую солнцем и деятельностью человека тепловую (на уровне биологических температур) энергию окружающей

среды и преобразуют и ее в электрическую энергию, которая, естественно, затем самопроизвольно переходит в тепловую энергию. Это означает, что в биоэнергетике растительной клетки существует круговорот низкотемпературной тепловой (на уровне биологических температур) и электрической энергий.

Основные процессы в биоэнергетике клеток растений и животных зависят от работы замкнутых цепочек каталитических ферментных комплексов (белковых генераторов электрического тока) ЭТЦ. Поэтому, поскольку комплексы ЭТЦ мембран клеток растений и животных содержат активные формы кислорода (АФК) и пероксид водорода [10], можно предположить, что существующие в биоэнергетике клеток растений процессы "перекачки" из окружающей среды низкопотенциальной тепловой (на уровне биологических температур) энергии, подобно "тепловому насосу", имеют место и в биоэнергетике клеток животных.

Итак, разложение присутствующего в ЭТЦ митохондрий клеток животных пероксида водорода, вероятно, подобно растительной клетке, идет по термохимическому (с "перекачкой", подобно "тепловому насосу", тепла из окружающей среды) механизму с выделением молекулярного кислорода. Таким образом, в работе белковых электрических генераторов ЭТЦ клеток и не только растений, но, по всей вероятности, и животных, участвуют не только электрическая и химическая (АТФ), но и низкопотенциальная тепловая (на уровне биологических температур) энергии.

В этом предположении белковые электрогенераторы ЭТЦ внутренних мембран митохондрий клеток животных, как и клеток растений, преобразуют не только энергию электронов, но и, в результате присутствия в ЭТЦ пероксида водорода, низкопотенциальную тепловую энергию при создании циклического, непрерывного, "саморегулируемого" однонаправленного движения электронов в ЭТЦ и одновременно для создания сопряженного с ним перемещения сквозь те же клеточные мембраны протонов, создающих на них разность электрических потенциалов, энергия которых с помощью АТФ-синтеза преобразуется в химическую энергию АТФ.

Новый подход к теоретическим исследованиям и моделированию процессов в биоэнергетике клеток может быть основан на конвергенции биоэнергетики и нанотехнологии.

Энергопреобразующие белковые комплексы растительных и животных клеток –



наноразмерные гетероструктуры – занимают в пространстве от 10 до 100 нанометров (нм). Активные хромофоры, геммы, железосерные кластеры и хлорофилл комплексов имеют в диаметре около 1 нм [11].

Поскольку наноструктуры – это естественный уровень организации живого и неживого, молекулярная биология предоставляет свои идеи и компоненты, а нанотехнология обеспечивает новые инструменты и методы для исследования и моделирования фундаментальных процессов клеточной биологии.

В соответствии с вышеизложенным, а также в результате анализа достижений отечественных и зарубежных биоэнергетиков мною был разработан и применен новый подход к исследованию и моделированию свойств и механизма работы белковых электрогенераторов ЭТЦ мембран клеток животных и растений на основе конвергенции биоэнергетики и нанотехнологии [12], [13].

МОДЕЛИРОВАНИЕ РАБОТЫ БЕЛКОВЫХ ЭЛЕКТРОГЕНЕРАТОРОВ

В соответствии с этим подходом белковые электрогенераторы ЭТЦ представляются каскадом нанобиогетероструктур – асимметричных, потенциальных, энергетических нанобиобарьеров (микробарьеров [14]), встроенных в замкнутый нанобиопроводник (внутреннюю мембрану митохондрии), по которым последовательно и однонаправлено движется малое количество (один, два или четыре) электронов. Чем их меньше в нанобиопроводнике ЭТЦ, тем более вероятно создание в ней преимущественно однонаправленного движения электронов (электрического тока), причем однонаправленное движение электронов преимущественно создают нанобиобарьеры.

Эти же нанобиобарьеры (белковые электрогенераторы), при прохождении через них высокоэнергичных электронов, используют их энергию и низкопотенциальную тепловую (биологические температуры) энергию окружающей среды для создания разности электрических потенциалов, образуя в ЭТЦ каскад электрических полей, которые и воздействуют на электроны, создавая их однонаправленное движение (электрический ток).

Этому соответствует представление о нанобиотеплоэлектрофизическом механизме работы асимметричных, потенциальных, энергетических нанобиобарьеров (белковых электрогенераторов), использующих низкопотенциальную тепловую (на уровне биологических температур)

энергию и энергию высокоэнергичных электронов проводимости ЭТЦ мембран клеток для преобразования их обычно хаотического движения в нанобиопроводнике в однонаправленное (электрический ток), что и было положено в основу моделирования работы данных белковых электрогенераторов.

Математическая модель нанобиотеплоэлектрофизического механизма работы отдельного, встроенного в замкнутый нанобиопроводник (ЭТЦ мембраны клетки), белкового электрогенератора

Так как любой из ферментных комплексов – асимметричных, потенциальных, энергетических нанобиобарьеров (белковых электрогенераторов), встроенных в нанобиопроводник (мембрану) ЭТЦ может быть отделен от других без потери своих исходных электрических свойств, рассмотрим вначале, как создается разность электрических потенциалов на противоположных сторонах (поверхностях) отдельного, встроенного в замкнутый нанобиопроводник нанобиобарьера.

В любом нанопроводнике (в металлическом или биологическом) электроны проводимости обычно находятся в состоянии непрерывного хаотического движения, обладая волновыми свойствами и определенными скоростями (энергиями), характерными для химической природы атомов этого нанопроводника (в нашем случае – нанобиопроводника).

Согласно законам волновой механики, если обладающий волновыми свойствами электрон движется в силовом поле и сталкивается с потенциальным энергетическим барьером $U(x)$, (в нашем случае – нанобиобарьером) ниже кинетической энергии этого электрона, он может либо преодолеть нанобиобарьер (D), либо оттолкнуться от него (R).

В ЭТЦ мембран клеток мы имеем дело с электронами, обладающими кинетической энергией (W) и волновыми свойствами (волнами де Бройля), движение которых в потенциальном поле, являющимся функцией только одной переменной x , описывается волновым уравнением Шредингера [14]:

$$\Delta\psi + \frac{8\pi^2m}{h^2}(W - U(x))\psi = 0. \quad (1)$$

Если в области с произвольным ходом потенциала $U(x)$ он на расстоянии длины волны де Бройля изменяется не очень быстро, то решение уравнения Шредингера может с достаточным



приближением быть представлено функцией по Вентцелю, Крамерсу и Бриллюэну:

$$f = \frac{a_1}{[W - U_{(x)}]^{1/4}} \cdot e^{-\frac{2\pi i}{h} \int_{x_0}^x \sqrt{2m(W - U_{(x)})} dx} + \frac{a_2}{[W - U_{(x)}]^{1/4}} \cdot e^{-\frac{2\pi i}{h} \int_{x_0}^x \sqrt{2m(W - U_{(x)})} dx} \quad (2)$$

Эта функция означает, что в решении уравнения Шредингера имеются две волны. Одна из них движется, например, вправо на нанобиобарьер, а вторая – влево от него, и ее можно считать "отраженной".

Квадраты модулей обоих членов этого уравнения представляют собой, как известно, интенсивности этих волн, то есть относительные количества электронов в единице объема каждой волны. Плотность электронов в каждой волне, с точностью до соответствующего множителя, может быть представлена как a_1^2 и a_2^2 .

Если проходящая на нанобиобарьер волна a_1 однозначно соответствует прошедшей через него волне b_1 и отраженной волне a_2 , то коэффициент прохождения D (вероятность перехода нанобиобарьера) и коэффициент отражения R могут быть представлены как:

$$D = \left| \frac{b_1}{a_1} \right|^2 \text{ и } R = \left| \frac{a_2}{a_1} \right|^2, \text{ где } R + D = 1. \quad (3)$$

Определение прозрачности энергетического нанобиобарьера $D(W)$, то есть определение отношения проникающих через нанобиобарьер электронов к числу прошедших через него, как известно, относится к частным задачам волновой механики. Что касается формы нанобиобарьера, рассматриваемой в описываемом здесь эксперименте, то формула его прозрачности может быть записана в виде:

$$D = \frac{\alpha_m (2^s)^2}{\alpha_{n-s} \left[\left(1 + \frac{\alpha_n}{\alpha_{n-1}} \right) \left(1 + \frac{\alpha_{n-1}}{\alpha_{n-2}} \right) \dots \left(1 + \frac{\alpha_{n-s+1}}{\alpha_{n-s}} \right) \right]^2}, \quad (4)$$

где $\alpha_n = \frac{2\pi}{h} \sqrt{2m(W - U_n)}$, а s – число шагов (ступеней).

При выводе этой формулы использовался приближенный метод потенциальных скачков, так

как точное решение уравнения Шредингера представляет значительные математические трудности в случае произвольного потенциального движения.

Формула (4) также означает, что при форме нанобиобарьера с большим числом ступенек, при условии, что ширина каждой ступеньки не превышает длину волны де Бройля, плотность электронов остается постоянной (отражение отсутствует).

В случае прямоугольной формы нанобиобарьера с одной ступенькой формула (4) принимает обычный в этом случае вид:

$$D = \frac{4\alpha_n \cdot \alpha_{n-1}}{(\alpha_{n-1} + \alpha_n)^2} \text{ или } D = \frac{4[(W-U)W]^{1/2}}{[W^{1/2} + (W-U)^{1/2}]^2}, \quad (5)$$

где W – кинетическая энергия электрона; U – величина потенциала нанобиобарьера.

Из этого следует, что прозрачность потенциального нанобиобарьера во многом определяется формой кривой роста его потенциала, которая зависит не только от высоты нанобиобарьера, но и от числа ступеней этого роста. Чем более пологой будет его форма (чем больше ступеней), тем большая часть падающих на нанобиобарьер электронных волн (электронов) пройдет через него.

Если функция распределения электронов от их скорости слева и справа от нанобиобарьера одинакова, то проблема проникновения электронов через нанобиобарьер может быть сведена, в первом приближении, к его прозрачности в любом направлении. Это приближение тем более законно в данном конкретном случае, что, при одной и той же химической природе частей нанобиопроводника слева и справа от нанобиобарьера и равенстве их температур, функция распределения электронов (по Ферми) остается постоянной.

Электроны не совсем свободны в нанобиопроводниках, но имеют вполне определенные и значительные скорости (энергии), соответствующие химическим свойствам нанобиопроводника, его структуре и температуре. Таким образом, электронные волны имеют определенные значения, и их размеры находятся в пределах от 10 см и меньше.

Задача об электронах, падающих в данном случае на асимметричный, энергетический, потенциальный нанобиобарьер, может быть представлена в виде задачи о последовательности волн,

падающих на него. Общее количество электронов, пересекающих этот нанобиобарьер, можно представить в виде уравнения:

$$i = e \int_0^{\infty} D(w)N(w)dw, \quad (6)$$

где $D(w)$ – прозрачность потенциального нанобиобарьера (вероятность проникновения) для электронов с энергией w , $N(w)$ – количество электронов с энергией в интервале $w \dots (w + dw)$.

Нанобиоэлектрофизическая модель механизма работы белкового электрогенератора

Если функция распределения электронов, в зависимости от скорости, слева и справа от нанобиобарьера аналогична, то возможность проникновения электронов через нанобиобарьер может быть сведена, в первом приближении, к его прозрачности в любом направлении. Это приближение тем более применимо в данном конкретном случае, что при одной и той же химической природе нанобиоструктур и равенстве их температур функция распределения электронов (по Ферми) остается постоянной.

Применительно к возникновению преобладающего движения электронов в нанобиоструктурах идея о волновых свойствах электронов может использоваться следующим образом. Предположим, что у нас есть однородный нанобиопроводник, внутри которого в плоскости (x) силовое поле изменяется по причине присутствия здесь потенциального нанобиобарьера. Его ширина, при этом, должна быть соизмеримой с длиной свободного пробега электронов (в металлах это около 10^{-6} см, в нанобиоструктурах – больше).

Число электронов, приближающихся к нанобиобарьеру слева и справа, будет равным в единицу времени, поскольку его химический состав и температура предполагаются одинаковыми. Однако, если изменение потенциала на единицу длины этого нанобиобарьера будет несимметричным, количество электронов, которые проходят через него, будет взаимно неравным.

Таким образом, количество электронов, движущихся, например, справа налево, будет превышать количество электронов, движущихся в противоположном направлении. Это явление – преобладающее направление движения электронов – не может существовать долго. Это привело бы к нарушению закона энтропии в его обычной формулировке.

Чтобы не было такого нарушения, очевидно, внутри нанобиобарьера должно произойти некое

определенное изменение, компенсирующее это явление и предотвращающее нарушение закона энтропии. Прежде всего, должны измениться условия прохождения электронов через нанобиобарьер, чтобы создать новое состояние равновесия (баланса), в котором количество электронов, проходящих через нанобиобарьер и находящихся слева и справа от него, вновь будет равно друг другу.

Предположим, что первоначальная прозрачность нанобиобарьера для движущихся электронов, скажем, слева направо имела определенную величину. Теперь она будет уменьшаться в соответствии с потенциальным сдвигом ΔU . Также изменится прозрачность нанобиобарьера для электронов, движущихся в противоположном направлении. Вначале она заметно отличалась от движения электронов слева направо. Теперь она будет увеличиваться, чтобы восстановить их равенство.

Прозрачность барьера для электронов, движущихся слева направо, несколько уменьшится, а для электронов, движущихся справа налево, немного увеличится, чтобы восстановить баланс (такое, динамическое равновесие, безусловно, устанавливается также в случае присутствия активных нагрузок на замкнутую систему нанобиобарьеров, как это имеет место, например, в ЭТЦ биоэнергетики клеток).

Разница потенциальной энергии между левой и правой частями нанобиобарьера выводится из равенства коэффициентов прозрачности энергетического барьера ($D_1 = D_2$), а разность электрических потенциалов – путем деления разности потенциальной энергии на сторонах нанобиобарьера на заряд электрона.

В случае, если электрон с кинетической энергией $W = 4$ эВ преодолевает нанобиобарьер прямоугольной формы с высоты потенциального барьера $U = 2$ эВ, разность электрических потенциалов на сторонах нанобиобарьера составит около 0,103 В [15].

Из этого следует, что при соответствующем выборе подходящей формы у отдельного потенциального нанобиобарьера (белкового электрогенератора), встроенного в замкнутый нанобиопроводник, в котором электроны постоянно хаотично движутся с определенными скоростями, характерными для химической природы этого нанобиопроводника, можно получить определенную разность электрических потенциалов.

Этот эффект увеличится в несколько раз, если ограничить число степеней свободы движущихся



электронов. Главными условиями этого является максимальное уменьшение поперечного сечения нанобиопроводника и ширины нанобиобарьера до атомных или наноразмеров. Этим условиям удовлетворяют размеры нанобиоструктур ЭТЦ.

Если размеры отдельного, встроенного в нанобиопроводник, нанобиобарьера (белкового нанобиогенератора электроэнергии) соответствуют этим условиям, а химические свойства нанобиопроводника постоянны по всей длине ЭТЦ, исключая, конечно, нанобиобарьеры (белковые наноэлектрогенераторы), то соединяя все эти элементы последовательно в замкнутую цепь (подобную ЭТЦ), можно получить необходимое суммированное электрического потенциала в этой цепи.

Нанобиотеплоэлектроэнергетическая модель механизма работы белкового электрогенератора

В соответствии с химической природой и температурой нанобиопроводника электроны проводимости обладают вполне определенными и скоростями (энергиями). Поэтому, с энергетической точки зрения, процесс получения определенной разности электрических потенциалов в рассматриваемой системе – замкнутый нанобиопроводник и отдельный встроенный в нее асимметричный, потенциальный, энергетический нанобиобарьер – будет происходить следующим образом. В начальный момент времени, когда справа от нанобиобарьера еще нет избыточного количества электронов, то есть нет еще дополнительных зарядов в этой его части, движущиеся слева на нанобиобарьер электроны будут пересекать зону нанобиобарьера без изменения своей энергии, так как сколько они ее теряют на преодоление верхнего уровня нанобиобарьера, ровно столько же они и приобретут ее скатываясь с него вниз, в нанобиопроводник.

После того, как справа от асимметричного нанобиобарьера в результате поступления сюда движущихся слева на нанобиобарьер дополнительных электронов и увеличения их плотности (концентрации зарядов) уровень потенциальной энергии здесь возрастет, а слева от асимметричного нанобиобарьера плотность (концентрация) и, соответственно, уровень потенциальной энергии уменьшатся, что приведет к смещению потенциального уровня энергии на разных сторонах нанобиобарьера, и разность между уровнями потенциальной энергии на разных его сторонах не будет равна нулю.

При преодолении нанобиобарьера электрон теряет определенное количество энергии,

а восстанавливает, по причине уменьшения потенциальной энергии слева от барьера, гораздо меньше, на величину ΔU . Эта потеря энергии сказывается на скорости электрона, которая определяется уже не величиной W , а $W - \Delta U$.

Однако электрон, оказавшись после прохождения нанобиобарьера в той же среде (в нанобиопроводнике), что и до его прохождения, обязательно должен будет восстановить ее прежнюю величину.

Это увеличение скорости электрона может произойти в результате отбора (поглощения) им необходимого количества энергии в результате многократного взаимодействия с другими атомами и электронами нанобиопроводника. Доказательством возможности такого процесса могут служить известные эффекты Пельтье и Томсона, а также так называемая теплота Гельмгольца [16].

Электроны могут восстановить прежнюю величину энергии также в результате отбора (поглощения), перекачки, подобно "тепловому насосу" (как это происходит в ЭТЦ клеток растений и, вероятно, клеток животных), недостающего, потерянного, необходимого ему количества низкопотенциальной тепловой энергии из окружающей среды. Это означает, что низкопотенциальная тепловая энергия и здесь, в рамках этой модели – необходимый участник процесса биогенерации электроэнергии.

Таким образом, работа нанобиотеплоэлектрофизического механизма нанобиобарьеров (белковых генераторов электроэнергии) ЭТЦ состоит (в процессе преодоления их электронами) в формировании на противоположных сторонах нанобиобарьеров разности электрических потенциалов (разной плотности зарядов электронов) – электрических полей (в ЭТЦ – это каскад таких полей) определенной направленности и создании, благодаря этому, преимущественно однонаправленного (в обычных условиях хаотического), последовательного движения малого числа (одного, двух, четырех) электронов – электрического тока в ЭТЦ.

В процессе же преодоления электронами нанобиобарьеров они теряют часть своей кинетической скорости (энергии) и восстанавливают ее прежнюю величину (энергию) в результате или отбора необходимого количества энергии при многократном взаимодействии с другими атомами и электронами нанобиопроводника, или (и) поглощения, перекачки, подобно "тепловому насосу", необходимого количества



низкопотенциальной тепловой энергии (на уровне биологических температур) из окружающей мембрану клетки среды. Такому поглощению электроном тепловой энергии способствует (как и в случае с растительной клеткой) то, что разложение присутствующего в ЭТЦ пероксида водорода, с выделением молекулярного кислорода, возможно по термохимическому механизму. Это означает, что тепловая энергия и здесь – необходимый участник процесса.

Следует отметить высокую квантовую и энергетическую эффективность (нанобиобарьеров ЭТЦ) биоэнергетики клеток. Так, эффективность преобразования клетками растений энергии поглощенного при фотосинтезе света в энергию разделенных зарядов, например, достигает 100% с КПД около 60% [11]. Если учитывать дополнительный вклад низкопотенциальной тепловой энергии в этом преобразовании, то КПД может быть и больше [9].

Высокую квантовую и энергетическую эффективность работы биоэнергетики клеток можно объяснить также физическими свойствами их нанобиоструктур: высокой электропроводностью, большой длиной свободного пробега электронов, развитой поверхностью взаимодействия с окружающей средой, обладающей низкопотенциальной тепловой энергией; "баллистическим", без потери энергии, пролетом электронов в нанобиопроводнике, а также тем, что электрон при своем движении в нанобиопроводнике переносит с собой энергии во много раз больше, чем тратит ее на преодоление омического сопротивления [17].

Для создания наногетероструктур с необходимыми, подобными нанобиобарьерам (белковым электрогенераторам), свойствами, предлагается использовать химические модификации графена: диэлектрики графан и флюорографен, двумерные кристаллы нитрида бора и полупроводникового фосфора и других химических элементов, располагая их монослои один над другим. Гетероструктура была получена, например, в результате инкапсуляции графена между двумя кристаллитами нитрида бора, что также защищает графен от воздействия окружающей среды [18]. Из подобных наногетероструктур, возможно, будут создавать асимметричные, потенциальные, энергетические нанобарьеры, прототипы которых – нанобиобарьеры (белковые электрогенераторы ЭТЦ клеток).

В среде инертного газа, например, получены стабильные на воздухе, располагающиеся

слоями 2D-материалы. Блоки из подобных стабильных 2D-кристаллов будут служить, по мнению исследователей, стандартными наногетероструктурами для различных устройств, в том числе, возможно, и легких батарей для мобильного аккумулирования энергии [19]. В дополнение к этим элементам для создания экспериментальной схемы будущего нанотеплоэлектрогенератора, как и электробатареи из них, во Франции изготовлены асимметричный нанобарьер (молекула) и наноамперметр [20]. Исследования по созданию наноаккумулятора (суперконденсатора) электроэнергии как элемента схемы будущего гибридного нанотеплоэлектрогенератора (производителя и хранителя электроэнергии) идут в настоящее время во многих научных центрах мира.

ВЫВОДЫ

- Осуществлены, на основе конвергенции нанотехнологии и биоэнергетики, фундаментальные теоретические исследования белковых электрогенераторов ЭТЦ нанобиоэнергетики клеток растений и животных;
- созданы квантово-волновые нанобиоэлектрофизическая, нанобиотеплоэлектроэнергетическая и математическая модели механизма работы белковых электрогенераторов ЭТЦ мембран клеток;
- получены знания о том, что ЭТЦ живых клеток – это нанопроводящая электроны, замкнутая, циклически действующая, автономная, саморегулируемая цепь – система, состоящая из встроженных в нее белковых электрогенераторов/преобразователей энергии возбужденных, высокоэнергичных электронов и рассеянной в окружающей их среде низкопотенциальной тепловой (на уровне биологических температур) энергии в энергию электрическую, которую клетка с помощью АТФ-синтазы преобразует в химическую энергию АТФ;
- созданы квантово-волновые нанобиоэлектрофизическая, нанобиотеплоэлектроэнергетическая и математическая модели механизма работы белковых электрогенераторов ЭТЦ мембран клеток.

Расчеты на основе предложенной математической модели показывают, что при соответствующем выборе формы у отдельного асимметричного, потенциального, энергетического нанобиобарьера (белкового наноэлектрогенератора), встроженного в замкнутый нанобиопроводник (нанобиомембрану), где электроны обычно



постоянно и хаотично движутся с определенными скоростями, характерными для химической природы этого нанобиопроводника, на противоположных сторонах нанобиобарьера можно получить определенную разность электрических потенциалов. Иная модель, например, основанная на теории Дирака об электронах с отрицательным состоянием энергии, не изменит основных, представленных здесь рассуждений и обоснований, она может лишь повлиять на математическое их оформление [21].

Если химические свойства нанобиопроводника постоянны по всей длине, исключая, конечно, нанобиобарьеры (белковые электрогенераторы), то соединяя эти элементы последовательно, в том числе и нанобиобарьеры, через которые электроны движутся в прямом и обратном направлениях (но в итоге однонаправлено) в замкнутую цепь (подобную ЭТЦ), можно получить как необходимое суммирование электрического потенциала, так и циклически действующий в этой цепи однонаправленный поток электронов – электрический ток, который можно будет использовать в другой, внешней электрической, цепи для производства работы.

ЭТЦ клеток могут стать прообразом для создания в будущем экспериментальной модели нанотеплоэлектрогенератора, принципиальная схема которого, а также его компоненты (как и нанобиоструктуры ЭТЦ-мембран клеток) будут состоять из 2D-наноструктур и 3D-наногетероструктур.

Дальнейшее развитие этих теоретических и проведение экспериментальных исследований, возможно, позволит узнать у живой клетки, работающей в нанометровом масштабе, как безопасно для окружающей природы, особо эффективно и автономно получать электроэнергию.

Текущее изменение парадигмы в познании природы и технологического развития – это переход к системным знаниям и конвергенция нанобиотехнологий. Создание таких конвергентных технологий позволит строить системы для генерации, хранения и использования электроэнергии нового поколения, сопоставимые по эффективности с естественными организмами [22].

Перспективы

1. Открываются новые подходы к исследованию возможности управления процессами биоэнергетики клеток.
2. Упрощается создание искусственной модели белкового электрогенератора – автономного,

мобильного нанотеплоэлектрогенератора, использующего нанобиотеплоэлектрофизическую технологию преобразования ЭТЦ клетки энергии электронов, а также возобновляемой солнцем и пополняемой деятельностью человека низкопотенциальной тепловой энергии окружающей среды, в энергию электрическую.

3. Создание такого нанотеплоэлектрогенератора, возможно, позволит решить проблемы нехватки энергии и глобального потепления.
4. Появляется возможность замены ряда биологических органов искусственными в результате комбинации биологических и небиологических (нанотехнологических) составляющих.
5. Проблема возникновения жизни как на Земле, так и на других планетах может быть рассмотрена с точки зрения новых представлений о процессах в нанобиоэнергетике клеток.

ЛИТЕРАТУРА/REFERENCES

1. Семенов В.С., Бейльман А.В. Актуальные проблемы авиации и космонавтики. 2015. Т. 2. С. 126.
2. Чижевский А.Л. На берегу Вселенной. М.: Мысль, 1995. С. 565.
3. Ощепков П.К. Избранное. Может ли человечество использовать энергию окружающей среды? ФГБОУ ВПО "Ижевский государственный технический университет", 2014. С. 59–274.
4. Xu J., Lavan D.A. Designing artificial cells to harness the biological ion concentration gradient // Nature Nanotechnology. 2008. V. 3. PP. 666–670.
5. Потапова Т.В. Энергетика живой клетки // В мире науки. 2006. № 3. С. 41–51.
6. Mitchell P. Coupling of phosphorylation to electron and hydrogen transfer by chemiosmotic type of mechanism. Nature. 1961. Vol. 191. PP. 144–148.
7. Самуилов В.Д., Кондрашин А.А. Энергия клетки – электричество // Наука в СССР. 1981. С. 84–93.
8. Скулачев В.П., Богачев А.В., Каспаринский Ф.О. Мембранная биоэнергетика. Учебное пособие. М.: Изд-во МГУ, 2010. 368 с.
9. Komissarov G.G. Photosynthesis as a thermal process Current Res. In Photosynthesis Ed. Baltschefskey H. Netherlands: Kluwer Akad. Publish., 1990:107–109.
10. Chen Q., Vazquez E.J., Moghaddas S., Hoppe C.L., Lesnefsky E.J. (2003) J. Biol. Chem., 278, pp. 36027–36031.



11. Скулачев В.П., Шувалов В.А. Фотосинтез и молекулярная энергетика. Вестник РАН, 2006, т. 76, № 5, с. 437–443.
12. Сидоров М.А. О механизме генерации электротока живой клеткой. М., Спутник, 2002.
13. Сидоров М.А. Нанofизическая модель генерации электроэнергии дыхательной цепью митохондрий живой клетки. Nanotechnics, 2008, № 2, с. 83–87.
14. Ощепков П.К. Избранное. Может ли человечество использовать энергию окружающей среды? ФГБОУ ВПО "Ижевский государственный технический университет", 2014. С. 260–268.
15. Ощепков П.К. Избранное. Может ли человечество использовать энергию окружающей среды? ФГБОУ ВПО "Ижевский государственный технический университет", 2014. С. 265.
16. Ощепков П.К. Избранное. Может ли человечество использовать энергию окружающей среды? ФГБОУ ВПО "Ижевский государственный технический университет", 2014. С. 266.
17. Ощепков П.К. Избранное. Может ли человечество использовать энергию окружающей среды? ФГБОУ ВПО "Ижевский государственный технический университет", 2014. С. 239.
18. Морозов С.В. Успехи физических наук, 2012, с. 437–439.
19. Cao Y., Mishchenko A., Yu G.L., Khestanova K., Rooney A., Prestat E., Kretinin A.V., Blake P., Shalom M.B., Balakrishnan G., Grigorieva I.V., Novoselov K.S., Piot B.A., Potemski M., Watanabe K., Taniguchi T., Haigh S.J., Geim A.K., Gorbachev R.V. Quality heterostructures from two dimensional crystals unstable in air by their assembly in inert atmosphere. Nano Letters, 2015.
20. Жоаким К., Плеввер Л. Нанонауки. Невидимая революция. М., КоЛибри, 2009. С. 240.
21. Ощепков П.К. Избранное. Может ли человечество использовать энергию окружающей среды? ФГБОУ ВПО "Ижевский государственный технический университет", 2014. С. 213–214.
22. Алфимов М.В. В поисках ответа // Российские нанотехнологии, 2011, т. 6, № 9–10, с. 10.

Декларация о конфликте интересов. Автор заявляет об отсутствии конфликтов интересов или личных отношений, которые могли бы повлиять на работу, представленную в данной статье.

Откройте для себя НОВЫЕ ВОЗМОЖНОСТИ

Компактные инфракрасные спектрометрические модули, охватывающие диапазоны длин волн 1350-1650 нм, 1550-1850 нм и 1750-2150 нм.

Применения:

- Контроль продуктов питания и сельскохозяйственной продукции
- Распознавание химических веществ и материалов
- Обнаружение влаги
- Сортировка пластика

HAMAMATSU
PHOTON IS OUR BUSINESS
www.hamamatsu.com

Представительство Hamamatsu Photonics в России и СНГ
Тел: +7 (495) 258-85-18, E-mail: info@hamamatsu.ru