МЕМБРАННЫЕ МОДЕЛИ И АНЗАЦ ДВУХСЛОЙНОГО ГРАФЕНА КАК МЕМБРАНОМИМЕТИКА

Градов О. В.

Институт энергетических проблем химической физики им. В.Л. Тальрозе, Российская академия наук, http://www.inepcp.ru
119334 Москва, Российская Федерация

Поступила в редакцию 16.06.2016

Представлена действительным членом РАЕН С.П.Губиным

Начиная с пионерских работ основателя мембраномиметической химии ("membrane mimetic chemistry") Яноша Фендлера, известно, что некоторые атомные или молекулярные (в том числе наноразмерные) кластеры и пленки способны имитировать функции мембран. Мембраномиметиками могут быть как частично упорядоченные среды ("soft matter"), так и твердофазные носители, в том числе – в иммобилизованном состоянии. Известно, что мембраномиметические характеристики могут обнаруживать как пленочные проводники, в том числе – обладающие магнитными свойствами, так и полупроводники. Если представить агентный обмен на мембранах в операторном виде, то химизм мембран или их миметиков, равно как различие между атомными и молекулярными кластерами или же слоями, перестают иметь значение, вследствие чего мембраномиметика мезоструктур и наноструктур существенно не отличаются друг от друга в агентном приближении. Данный обзор рассматривает различные аспекты подобия свойств графеновых наноструктур свойствам мембран и бионических мембраноподобных наноматериалов.

Ключевые слова: **графен, двухслойный графен, бислои, мембраномиметика, нанобионика**

УДК 544.77, 53.098

Содержание

1. **Введение. Проблема полноты мембраномиметического дизайна и моделирования (25)**
2. **Неоднозначность дефиниций мембранных моделей: полусинтетические, синтетические, биогенные модельные мембраны (26)**
3. **Мембраномиметика и её отличия от мембранной биомиметики. Физические свойства мембраномиметиков в субъективных моделях (27)**
4. **Полупроводниковые мембраномиметики в рамках физики твердого тела и ранние ошибочные представления мембранной теории (28)**
5. **Сверхпроводящие мембраномиметики и модели мембран (29)**
6. **Ферроэлектрические модели мембран и мембраномиметики (29)**
7. **Анзатц графена (31)**

Литература (32)

1. ВВЕДЕНИЕ. ПРОБЛЕМА ПОЛНОТЫ МЕМБРАНОМИМЕТИЧЕСКОГО ДИЗАЙНА И МОДЕЛИРОВАНИЯ

Известно, что в основе функционирования физиологических (в том числе, начиная с цитофизиологических) систем лежат мембранные структуры, обеспечивающие селективный перенос в цитоплазму ионов и других агентов, создание биохимических градиентов, требующихся для осуществления физиологических процессов, рецепцию на поверхности, осуществление электрофизиологического возбуждения/ торможения за счет генерации и проведения биопотенциалов, матричное нечеткое фиксирование взаимодействующих мембранных белков в ходе их взаимодействия, механическую стабильность и барьерную протекцию, обеспечение взаимодействия клетки с другими клетками, межклеточным веществом, реакционно-диффузионные процессы морфогенеза, в ходе которых меняется форма

органелл, клеток и надклеточных образований, вплоть до органов и организма в целом [1, 2].

Соответственно, структура/система, претендующая на достаточно адекватное воспроизведение или замещение функции мембраны, в идеальном случае должна обладать не менее, чем полным набором физико-химических свойств/характеристик (или, хотя бы, их феноменологических аналогов), благодаря которым эти функции естественных биомембран реализуются. В противном случае не имеет достаточного основания сопоставление функций модели мембраны и естественных биомембран как функциональных систем, так как физико-химические системы, односторонне выполняющие ту или иную функцию, характерную для мембран (например, только ионообменную или только механическую или только энергозапасающую) широко распространены в природе и промышленности, но принятие их в качестве референсных или абсолютных моделей биомембран приводит к редукции фундаментально важных переменных, введению a priori нормировок, допущений (которые вводятся для упрощения либо для лимитирования неизбежных в данном случае ошибок), понижению эвристической ценности моделирования как такового.

Как следует из фундаментальных положений теории моделирования, критериями неполноты моделей низшего звена являются невозможность реализации с его помощью функционально высших звеньев и необходимость ввода в них дополнительных звеньев, компенсирующих отсутствие той или иной функции у низшего звена [3-5] (это следует из того, что для адекватной структурно-функциональной модели должно существовать отображение, морфизм, взаимно-однозначно сопоставляющий функциональные звенья оригинала элементарным звеньям модели – т.н. «one-to-one mapping»). В случае моделей искусственных мембран (мембраномиметиков, гр. mimetes – подражатель) критерий неполноты их как звеньев/элементов для построения моделей высшего уровня очевиден – это невозможность воспроизведения на большинстве из них полного набора функций, лежащих в основе физиологии мембран естественной клетки (перечень см. выше), а, следовательно – и моделей клетки, построенных с использованием данных звеньев как таковых.

2. НЕОДНОЗНАЧНОСТЬ ДЕФИНИЦИЙ МЕМБРАННЫХ МОДЕЛЕЙ: ПОЛУСИНТЕТИЧЕСКИЕ, СИНТЕТИЧЕСКИЕ, БИОГЕННЫЕ МОДЕЛЬНЫЕ МЕМБРАНЫ

Это можно проиллюстрировать на множестве примеров. Несмотря на активное внедрение с 1960-х гг. мембранных технологий для имитации и моделирования клеток (т.н. «artificial cells» [6, 7]), комплексный эквивалент мембранных феноменов воспроизведен не был (см. перечень выше), так как использовались упрощенные мембраны (в т.ч. – чисто синтетические, например – нейлон), не адекватные по свойствам клеточным мембранам и их структурным интеркалятам. Как следствие этого, зафиксированное в качестве нормы представление о независимости свойств модели клетки от свойств используемого мембраномиметика, привело к тому, что до сих пор полнофункциональной модели клетки, основанной на мембранах, не обладающих полным перечнем свойств биомембран, не существует (что очевидно, так как гипотетическая клетка с такой условной мембраной не выполняла бы своих базовых функций, включающих обмен веществом со средой), а наивысшей адекватностью обладают модели, построенные на биоорганических компонентах, что относится, скорее, к редукции, чем к моделированию свойств клетки.

Классическим «мембраномиметиком» в данном контексте является фосфолипидный слой/бислой [8, 9], который является основой обычных биологических мембран [10]; миелин, составляющий оболочку естественных нервных волокон и содержащий в своем составе белок, т.н. MBP – myelin basic protein, также представляет собой «мембраномиметическую среду», используемую в эмульсионной/мицеллярной форме [11, 12]. Однако очевидно, что, по существу, это – уже имеющиеся в мембранах и оболочках клеток соединения, а не их модели – мембраномиметики.

Даже в случаях попыток моделирования функций на основе физико-химических свойств (например, с использованием тех или иных свойств

полиэлектролитов), как правило, реализация ведется с использованием стандартных липидов, которые могут быть извлечены из естественной клетки [13]. Базовые отличия синтетических и естественных мембран, лежащие в основе невозможности воспроизведения функций и свойств мембранных компартментов с использованием ряда модельных мембран, не обладающих свойством полноты дескрипторов, приведены в обзоре [14], поэтому на них можно подробно не останавливаться.

Иначе говоря, возникает проблема ре-интерпретации «минимальной клетки» не как клетки с минимальным геномом [15-21] и соответствующим ему сопутствующим нуклеотидным обменом [22-24], а как надструктуры, составленной из мембран, свойства которых необходимы и достаточны в совокупности для физиологического функционирования минимальной, по функциональным критериям, клетки или её модели.

Надо сказать, что на данный момент существуют работы, демонстрирующие понимание этого факта, однако задачи в них решаются не методами мембраномиметики, а, как и было указано выше, с привлечением обычных фосфолипидов, по определению, достаточных для реализации моделируемых функций. Как пример этого можно привести работы [25, 26], в которых используются уже известные липиды. При этом во многих работах подчеркивается либо что в состав минимальной клетки входят биологические компоненты, либо, в наиболее откровенных случаях, что система носит «полусинтетический» («semi-synthetic») характер [27, 28] (синтетический аспект как раз является аспектом моделирования или биомиметики [29, 30]).

Очевидно, что модель как объект исследования в данном случае не полностью перекрывается с моделью как предметом исследования, а предмет исследования имеет в себе перекрытие с другим объектом исследования. Модель клетки имеет в себе фрагмент состава мембраны клетки, который может быть изучен и в естественной клетке или в состоянии, не считающемся моделью клетки как таковой. В то же время рассматривать как модель мембраны систему невозможно, если она, по определению – самотождественная мембрана, а не мембраномиметик, но как биологическую модель, т.е. – биомиметик, её исследовать можно.

3. МЕМБРАНОМИМЕТИКА И ЕЁ ОТЛИЧИЯ ОТ МЕМБРАННОЙ БИОМИМЕТИКИ. ФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА МЕМБРАНОМИМЕТИКОВ В СУБЪЕКТИВНЫХ МОДЕЛЯХ

В связи с содержанием последнего замечания, возникают проблемы, связанные с различием мембраномиметики и мембранной биомиметики: система может быть монофакторным физическим мембраномиметиком, но не быть мембранным биомиметиком. Обратное утверждение неверно.

В связи с этим следует рассмотреть принципы мембраномиметики и дать определение границам приложимости её принципов для моделирования биомембран. Начиная с работ основателя мембраномиметической химии (“membrane mimetic chemistry”) Я.Фендлера [31, 32] известно, что некоторые атомные или молекулярные (в том числе наноразмерные) кластеры и пленки способны имитировать функции мембран. Мембраномиметиками могут быть не только частично упорядоченные среды (“soft matter”), но и твердофазные носители, в том числе – в иммобилизованном состоянии [33].

Мембраномиметические характеристики, согласно представлениям и экспериментальным данным электрохимии/физики твердого тела могут обнаруживать также пленочные проводники, в том числе – обладающие магнитными свойствами, и полупроводники [34-37]. Несовместимость, вплоть до контрадикторности, свойств разных мембраномиметиков дает основания полагать, что «критерии подобия» выбираются произвольно, а различие структурных уровней подобия вплоть до объектов, отличных от обычных мембран по порядку величины (как градиентные многослойные нанопленки из квантовых точек и низкоразмерные сверхпроводники, или атомные монослои и двумерный электронный газ), приводит к выводам о невозможности обобщения дефиниции мембраномиметиков по базовым физическим процессам, требуя перехода на высший уровень абстракции – формально-математический.

В противном случае мембрана перестает интерпретироваться как объект моделирования и становится объектом и предметом структурно-функциональных спекуляций.

Надо сказать, что контрадикторность подходов в мембраномиметике имеет эквивалент в мембранной биофизике и мембранной биомиметике, однако контрадикторные модели возникали на раннем этапе их развития – в 1960-е – 1980-е гг.; таким образом, есть предпосылки к исчезновению неопределенности в критериях мембраномиметики в последующие годы.

4. ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ МЕМБРАНОМИМЕТИКИ В РАМКАХ ФИЗИКИ ТВЕРДОГО ТЕЛА И РАННИЕ ОШИБОЧНЫЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЯ МЕМБРАННОЙ ТЕОРИИ

Так, в 60-80-е гг. были популярны представления о полупроводниковом и "псевдотвердотельном" характере действия биомембран. Утверждалось, что мембраны нейронов обладают полупроводимостью [38] и свойствами ионного psn-перехода [39], а также (эквивалентно полупроводниковым pn-мембранам, известным ныне [40]) характеристиками полупроводникового выпрямителя на биомолекулярных липидных слоях [41]. Существовал ряд работ, рассматривавших зонную плавку (либо, что эквивалентно, зонную перекристаллизацию) как модель активного трансмембранного переноса [42]. Полупроводниковые свойства находились у фотоактивных липидных мембран [43] и дыхательных мембранных белков (терминальная оксидаза аэробной дыхательной цепи переноса электронов катализирует перенос электронов на кислород) [44].

Одновременно с этим активно развивались представления, заимствованные из физики твердого тела (что несколько некорректно, так как биомембраны представляют собой soft matter [45]), в рамках которых постулировался твердотельный характер ряда фундаментальных биологических процессов. В частности, постулировался псевдо-твердотельный механизм электронного и ионного трансмембранного переноса [46] (так называемая supramolecular solid state biology). Однако это было спекулятивно на тот период по причине отсутствия супрамолекулярной химии и представления о процессах в полимерном твердом теле и конденсированных ассоциатах, начавших формироваться намного позднее [47], тем более – для условий заряженных поверхностей, которыми являются мембраны [48].

В частности, не были изучены хиральные твердотельные образования [49], твердотельные углеводные [50] и ионоселективные/ионообменные структуры [51] и т.п., которые хоть как-то можно было ассоциировать с биохимическими прототипами. Постулировалась также конкуренция диффузии ионов по дырочному (вакансионному) механизму в «электрогенных» мембранах нейроцитов [52], электронный перенос в биоструктурах и биоэнергетика, основанная на данном переносе [53,54], а также реактивность, основанная на данной биоэнергетике. В частности имела место твердотельная модель генерации и распространения потенциала действия в нейроне Ходжкина-Хаксли [55], непротиворечивая, в основном, с её «жидкостной» формой.

В 1960-е гг. выходили работы, сопоставлявшие твердотельный перенос энергии с мембранной активностью при фотосинтезе [56]. Этот подход интенсивно развивался в «эпоху физики полупроводников и твердого тела» (до 1990-х гг.) и сравнительно быстро затух в тот период, когда молекулярно-биологические достижения (и начавшая зарождаться нанонаука, позволившая оперировать ими) стали позволять более точно формулировать механизмы переноса электронов в биологической среде.

К концу 1980-х гг. слово «твердотельный» (solid state) при интерпретации механизмов работы тех или иных звеньев переноса электрона (например – пероксидаз, работающих как промоторы в электрохимии растворимых металлопротеинов [57]) стало принятым брать в кавычки (не следует это путать с промотерами для культивации бактерий на твердых средах, так как они до настоящего времени используются и не требуют кавычек при написании [58, 59]). Поэтому можно полагать, что выбор биомиметиков для имитации биомембран и выбор соответствующих моделей биомембран в данный период был следствием «научной моды», аналогично тому, как в более поздний период, характеризовавшийся развитием

нанотехнологии, мембранные синтетические подходы начали иметь выраженный уклон в наноматериаловедение [60].

5. СВЕРХПРОВОДЯЩИЕ МЕМБРАНОМИМЕТИКИ И МОДЕЛИ МЕМБРАН

Можно привести аналогичный пример с другим мембраномиметиком из списков Фендлера, являвшимся в 1970-х-1980-х гг. объектом «научной моды» – каким-либо пленочным сверхпроводником [36]. Биомембранные структуры не являются сверхпроводниками, однако пик «научной моды» тех лет породил множество работ, связывавших чувствительность ряда биологических структур к внешним полям и раздражителям (магнитному полю [61]; СВЧ [62]; любым раздражителям, реактивность к которым может быть описана законом Вебера-Фехнера [63]) со сверхпроводимостью.

При возникновении закономерных вопросов о причине данной интерпретации при отнюдь не криогенных температурах физиологической активности (в частности – имели место справедливые обвинения в нарушении «бритвы Оккама», т.е. – внедрении избыточных сущностей для описания простых объектов и явлений, описываемых в рамках имеющихся представлений), авторы подобных работ ссылались на сверхпроводимость при комнатной температуре в органических/биоорганических системах [64-66], которая как раз начинала входить в «научную моду» с начала 1980-х гг. (примеры обнаружения которой печатались в крупнейших журналах типа «Science» [67-69], но, тем не менее, требовалось тщательное отделение фактов от фантазий, артефактов и неверных интерпретаций [70]).

Это ставит данный «модный» сверхпроводниковый тренд в ряд периодически возникающих, но не имеющих под собой физической основы, псевдонаучных заявлений о роли сверхпроводимости в развитии онкологических заболеваний [71] и в здоровье человеческого тела [72]. Очевидно, что мембраномиметика на некорректной базе, будучи взята за прототип мембранной биомимиетики, не способна реализовать комплекс биомиметических функций. Таким образом, о биофизической корректности или мембранно-биомиметической ценности подобных представлений говорить не приходится. И в связи с этим нет смысла подробно рассматривать подходы, основанные на аналогии мембран со сверхпроводящими материалами.

6. ФЕРРОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ МЕМБРАН И МЕМБРАНОМИМЕТИКИ

Несколько лучше обстоит дело с другим типом мембраномиметиков – ферроэлектрическими/сегнетоэлектрическими пленками, комплексное мембраномиметическое моделирование на которых явилось возможным, благодаря обнаружению ферроэлектрических свойств в биоорганических средах [73-76], не ограничивающееся свойствами объёмных структур, но наиболее характеристично выражающееся в поведении мембранных/пленочных поверхностей.

В начале 1990-х гг. была предложена простая и электрофизиологически-адекватная модель мембранного возбуждения, основанная на аналогии билипидных биомембран и ферроэлектрических диффузных двойных слоев, выполняющих функцию «конденсатора», как и бислойные мембраны в ранних представлениях электробиологии [77]. В тот же период был предложен подход к интерпретации диэлектрических аномалий на модельных биомембранах (например, аксоне кальмара) как температурных эффектов, подчиняющихся закону Кюри-Вейса, которым, если исключить случаи неприменимости приближения среднего поля, как правило, описывается магнитная восприимчивость ферромагнетика выше точки Кюри (т.е. в парамагнитной области) [78].

Надо сказать, что методы цитологии и клеточной электрофизиологии подтверждают интерпретации мембранной возбудимости как отклика диффузных двойных слоев (типа слоя Гуи) в ряде известных случаев; в том числе с ферроэлектрическими характеристиками бислоев [79].

Для моделей с чисто физико-химическим («редукционистским») принципом воспроизведения поведения оригинала/прототипа, химизм среды-носителя не имеет существенного значения, в отличие от фазовых,

реологических и др. ключевых параметров. В связи с этим ферроэлектрические явления, подобные заложенным в основание моделей липидных мембран, срабатывают также в случае естественных пептидных нанотрубок [80, 81], обладающих активной поверхностью.

Если говорить о более далеком уровне абстрагирования, прямо следующем из указанного обобщения, то весьма близкие ферроэлектрические явления достижимы на пленках Ленгмюра-Блоджетт (на основе ряда полимеров) [82]. В то время как известно, что пленки Ленгмюра-Блоджетт являются, с одной стороны, хорошим приближением для моделей синаптосомальных активных мембранных структур [83], а, с другой стороны, моделью самих клеточных мембран [84] с электрохимической активностью [85] и различно трактуемой (как мембранная адгезия, измеримая тензиометрически, или как конъюгативная способность, измеримая методами координационной и супрамолекулярной химии, либо как иммунохимическая специфичность взаимодействия, измеримая, в частности, иммунофлуоресцентными или иммуноэлектрофоретическими методами) биомембранной аффинностью [86].

Таким образом, существуют функциональные характеристики данных ферроэлектрических структур, благодаря которым является возможным/рациональным их использование в качестве моделей активных мембран (термин «сегнетоэлектрические структуры» синонимичен по отношению к «ферроэлектрическим» и широко распространен в переводной периодике республик бывшего СССР и стран СЭВ [87, 88]).

В основе функционального подобия должна лежать веская структурная или физико-химическая причина, которую следует рассмотреть. Активность мембран биологических клеток в аспекте массопереноса (активного транспорта), передачи электрического сигнала и энергии есть функция ионных каналов. Поэтому адекватная модель мембраны клетки, а значит, в перспективе, и биологической клетки, должна содержать либо мембранные ионные каналы (что невозможно при существенном отличии среды их функционирования от естественной для цитофизиологических/биохимических условий), либо их функциональный эквивалент.

В случае, когда речь идет о синтетических ферроэлектрических средах, эквивалент функции является более адекватным, чем эквивалент химизма (то есть – модель имеет функциональный, но не субстратный характер), поскольку химизм ионных каналов не может работать в реологии ферроэлектриков, основанных на известных пленках.

Еще более логичным является способ моделирования, не требующий специализированного внедрения каналов в мембрану для придания ей полноценных мембраномиметических либо биомиметических свойств: в идеальном случае среда моделирования как таковая должна обладать свойством, обеспечивающим моделирование с её помощью каналов. В 1987 году в одном выпуске «Journal of Theoretical Biology» были одновременно опубликованы две коррелирующие работы, в соответствии с первой из которых [89], в обычных биомембранах имеют место ферроэлектрические области в каналоме, а, согласно второй, токи ионов и сопряженные с ними фазовые переходы в кортикальной области клетки или мембране могут быть описаны моделью ферроэлектрических каналов или их субъединиц [90]. В 1992 году В.С. Быстровым (ИМПБ РАН) предложена ферроэлектрическая фазонная модель натриевых каналов биомембраны [91], основанная на ранних работах данного автора по ферроэлектрикам, обладающим свойствами полупроводников, фотоэлектрический отклик в которых обусловливается флуктуонными и фазонными механизмами [92] (как несложно заметить, этот подход коррелирует с полупроводниковыми моделями мембран, цитированными выше).

Механизм передачи сигнала, основанный на квазичастицах, характеризуется более высокой степенью физического абстрагирования, чем аналогии, завязанные на конкретные типы ионов, адекватно работающие только в конкретной биохимической/биоорганической среде.

Впоследствии автором цитированных работ был осуществлен переход от моделирования только натриевых каналов [93] к анализу ионных каналов в целом [94] как структур, обладающих

откликом, открыванием/закрыванием (gating) [95].

Автором первичных работ (1987-го года [89, 90]) была осуществлена смычка модельных представлений о биоферроэлектрических явлениях и функции электрически-управляемых потенциал-зависимых ионных каналов [96]. Наблюдаемые стрикционные эффекты оказались хорошо коррелирующими с конформационными или стерическими изменениями и индуцированными фазовыми переходами в структуре мембранных каналов и окружающей мембраны при потенциал-зависимых ионных каналах [97, 98].

Единственным минусом модели стала необходимость использования аналогий с суперионной проводимостью и переходом ферроэлектрика в суперионное состояние (или суперионный переход) в некоторых релевантных случаях [97,99], что вызывало немало возражений со стороны специалистов, работавших с мембранами в зоне отсутствия аналогичных переходов. Вместе с тем, суперионный фазовый переход, как известно, во многих случаях, являясь сегнетоэластическим, характеризуется высокой вероятностью спонтанной деформации [100,101], что дает возможность его участия в ультраструктурном морфогенезе при наличии данного эффекта в субклеточных мембранных структурах.

Если говорить о современном тренде на исследование механотрансдукции как фактора развития и морфогенеза [102], то следует упомянуть концепции, рассматривающие феррожидкости как модели морфогенеза (см., напр., сб. «Morphogenesis: Origins of Patterns and Shapes», часть II, «Ferrofluids: a model system of self-organized equilibrium» [103]). Феррожидкость может при этом быть не ферромагнитной, а ферроэлектрической [104-107].

При этом надо учитывать, что и стандартные феррожидкости или т.н. ферромагнитные жидкости, не сохраняя остаточной намагниченности по завершении действия внешнего по отношению к ним поля, не являются, в сущности, ферромагнитными, а являются парамагнетиками или, точнее – суперпарамагнетиками [108-109]. Не говоря о том, что они не являются ни жидкостями, ни растворами как таковыми, являясь суспензиями. Пример неферрофлюида и нежидкости одновременно представляет космическая пылевая плазма, обладающая свойствами суперпарамагнитной жидкости [110].

Применимость феррожидкости в трассировании/самоорганизации зарядовых или заряд-сопряженных потоков (магнитоэлектростатических струй [109] и др.) может использоваться в моделях самоорганизации при мембранном возбуждении ионных каналов, опирающихся на принципы и методы физики ферроэлектриков [111].

Таким образом, в принципе может быть реализована более высокая степень интеграции миметиков ионных каналов в морфофизиологическую специализацию биомоделей с использованием ферроэлектрических мембран и мембраномиметических ферромагнитных структур – несмотря на то, что модельная среда не обладает биохимическим сродством или подобием к биомембранам.

В сущности, подобие оканчивается на уровне моделей 1960-х годов типа «аналогии между ионным транспортом через мембрану и электронным транспортом через границу раздела фаз» [112], однако моделирующая система при этом является более функциональной в силу наличия в ней агентов физического замещения активных ионных каналов. В ряде случаев возможно рассматривать спиновый/спинтронный перенос как альтернативу переноса ионов как носителей заряда сквозь ионные каналы.

Поэтому аналогичные функциональные критерии подобия являются применимыми и для анализа возможности рассмотрения слоев графена, в частности – двуслойного графена, как мембраномиметиков и моделей биомимембран (мембранных биомиметиков). Этот анализ производится во второй части, в которой будут рассмотрены вопросы, перечисленные в анзатце ниже.

7. АНЗАЦ ГРАФЕНА КАК МЕМБРАНОМИМЕТИКА

Для того, чтобы выполнять функцию миметика биомембран, графен, равно как и любой другой носитель, должен обладать такими свойствами, как:

1. Полупроницаемость, обеспечивающая селективный трафик ионов через поверхность, следовательно – ионные каналы/поры; в частности, должно наблюдаться блокирование таковых «каналов» (химических пор) тяжелыми элементами, тяжелыми металлами.
2. Двойной электрический слой, обеспечивающий аккумуляцию (как конденсатор) энергии, однонаправленный градиент носителей (как пример - разности электрохимических потенциалов ионов водорода на сопрягающих мембранах в хемиосмотической теории Митчелла, в соответствии с которой носители зарядов копятся на мембране), периодическую разрядку «емкости».
3. Механизмы диффузии редокс-агентов, в наиболее элементарном случае – газов и воды (в рамках пассивного транспорта), а также – редокс-регуляция жидкостной осмотической проницаемости; когда процесс обмена со средой носит циклический характер, это может/должно модулировать оптические и электрофизические параметры окруженной мембраномиметиком химической системы.
4. Электрофизическая генераторная активность, моделирующая или способная замещать функцию мембранного потенциала как динамического процесса с определенным спектром, который может быть рассмотрен как сигнал, передающийся с «псевдо-мембраны», а также индицирует проходящие на ней физические процессы; этот процесс может (должен, если речь идёт о регуляции конформации полем, что верно в случае вышецитированных ферроэлектрических моделей мембран) сопровождаться осцилляциями поверхности или синхронным изменением коррелирующих с локально фиксируемым зарядом параметров (например, гармоническим откликом каналов).
5. Способность формировать замкнутые поверхности, обеспечивая в результате этого компартментализацию и градиентное разделение реакционных процессов, в том числе – обеспечивающих процессы электрогенеза; способностью удваивать эти поверхности в случаях превышения критической поверхности (или массы) ограничиваемой ими среды, адекватно простейшим моделям цитотомии.
6. Сенсорные свойства по отношению к «первичным» физическим стимулам, отклик на которые имеет безусловный характер, сдвигая равновесие в результате первичных актов переноса заряда, то есть – не зависит от химизма среды.
7. Сенсорные свойства по отношению к воздействиям химических агентов внешней среды, сдвигающим равновесие субповерхностно протекающих процессов, опосредуемых поверхностью.
8. Возможность сорбции (хотя бы в рамках общеизвестной упрощенной записи уравнения Рогинского-Зельдовича/Еловича) и темплатирования отсепарированных агентов на поверхности.
9. Возможность привить к нему те или иные ксеногенные сенсорные агенты, аналогично тому, как прививаются иммунные комплексы на модельные везикулы, состоящие из фосфолипидов; в частности, такими агентами могут быть ферменты или некоторые иные соединения, обладающие специфической супрамолекулярной комплементарной фиксацией; в идеале – рационально замещение функций рецепторов и ферментов без использования самих рецепторов и ферментов.

Предполагается последующая публикация всех указанных требований по отношению к графену/графеноподобным структурам и, в частности, многослойному графену, нумерация разделов которой соответствует нумерации пунктов вышеприведенного списка.

ЛИТЕРАТУРА

1. Luckey M. *Membrane Structural Biology: With Biochemical and Biophysical Foundations.* Cambridge University Press, 2008, 344 p.
2. Yeagle PL. *The Membranes of Cells.* Amsterdam, Academic Press (Elsevier), 2016, 452 p.
3. Kron G. *Diakoptics; the piecewise solution of large-scale systems.* London, MacDonald, 1963, 166 p.
4. Peschel M. *Modellbildung fur signale und systeme.* Berlin, VEB Verlag Technik,1978, 183 p.
5. Namatame A, Kurihara S, Nakashima H. (Eds.)

Emergent Intelligence of Networked Agents. Berlin – Heidelberg, Springer, 2010, 258 p.
6. Chang TMS. *Artificial cells*. Springfield, Thomas, 1972, 207 p.
7. Chang TMS. *Artificial cells: biotechnology, nanomedicine, regenerative medicine, blood substitutes, bioencapsulation, and cell/stem cell therapy*. New Jersey, World Scientific, 2007, 455 p.
8. Bangham AD. Membrane models with phospholipids. *Prog. Biophys. Mol. Biol.*, 1968, 18: 29-95.
9. Alkaitis D, Merola AJ, Lehninger AL. Phospholipid bilayers as biological membrane models: the effect of N,N'-bis(dichloroacetyl)-1,12-diaminododecane. *J. Membr. Biol.,* 1972, 10(3):237-246.
10. Thompson TE. Experimental bilayer membrane models. *Protoplasma*, 1967, 63(1):194-196.
11. Nicot C, Vacher M, Vincent M, Gallay J, Waks M. Membrane proteins in reverse micelles: myelin basic protein in a membrane-mimetic environment. *Biochemistry,* 1985, 24(24):7024-7032.
12. Chatenay D, Urbach W, Cazabat AM, Vacher M, Waks M. Proteins in membrane mimetic systems. Insertion of myelin basic protein into microemulsion droplets. *Biophys J.*, 1985, 48(6):893-898.
13. Tiourina OP, Radtchenko I, Sukhorukov GB, Möhwald H. Artificial cell based on lipid hollow polyelectrolyte microcapsules: channel reconstruction and membrane potential measurement. *J. Membr. Biol.*, 2002, 190(1):9-16.
14. Timashev SF. From Biological to Synthetic Membranes. *Russ. Chem. Bull.*, 1988, 57(6):487-503
15. Maniloff J. The minimal cell genome: "on being the right size". *Proc. Nat. Acad. Sci. USA.*, 1996, 93(19):10004-10006.
16. Islas S, Becerra A, Luisi PL, Lazcano A. Comparative genomics and the gene complement of a minimal cell. *Orig. Life Evol. Biosph.*, 2004, 34(1-2):243-256.
17. Bork P, Ouzounis C, Casari G, Schneider R, Sander C, Dolan M, Gilbert W, Gillevet PM. Exploring the Mycoplasma capricolum genome: a minimal cell reveals its physiology. *Mol. Microbiol.*, 1995, 16(5):955-967.
18. Browning ST, Castellanos M, Shuler ML. Robust control of initiation of prokaryotic chromosome replication: essential considerations for aminimal cell. *Biotech. Bioeng.*, 2004, 88(5):575-584.
19. Delaye L, Moya A. Evolution of reduced prokaryotic genomes and the minimal cell concept: variations on a theme. *Bioessays*, 2010, 32(4):281-287.
20. Zhang LY, Chang SH, Wang J. How to make a minimal genome for synthetic minimal cell. *Prot. Cell.*, 2010, 1(5):427-434.
21. Juhas M. On the road to synthetic life: the minimal cell and genome-scale engineering. *Crit Rev. Biotechnol.*, 2016, 36(3):416-423.
22. Castellanos M, Wilson DB, Shuler ML. A modular minimal cell model: purine and pyrimidine transport and metabolism. *Proc. Nat. Acad. Sci. USA.*, 2004, 101(17):6681-6686.
23. Oberholzer T, Wick R, Luisi PL, Biebricher CK. Enzymatic RNA replication in self-reproducing vesicles: an approach to a minimal cell. *Biochem. Biophys. Res. Commun.*, 1995, 207(1):250-257.
24. Lluch-Senar M, Delgado J, Chen WH, Lloréns-Rico V, O'Reilly FJ, Wodke JA, Unal EB, Yus E, Martínez S, Nichols RJ, Ferrar T, Vivancos A, Schmeisky A, Stülke J, van Noort V, Gavin AC, Bork P, Serrano L. Defining a minimal cell: essentiality of small ORFs and ncRNAs in a genome-reduced bacterium. *Mol. Syst. Biol.*, 2015, 11(1):780.
25. Murtas G. Internal lipid synthesis and vesicle growth as a step toward self-reproduction of the minimal cell. *Syst. Synth. Biol.*, 2010, 4(2):85-93.
26. Castellanos M, Kushiro K, Lai SK, Shuler ML. A genomically/chemically complete module for synthesis of lipid membrane in a minimal cell. *Biotech. Bioeng.*, 2007, 97(2):397-409.
27. Murtas G. Question 7: construction of a semi-synthetic minimal cell: a model for early living cells. Orig. *Life Evol. Biosph.*, 2007, 37(4-5):419-22.
28. Caschera F, Noireaux V. Integration of biological parts toward the synthesis of a minimal cell. *Curr. Opin. Chem. Biol.*, 2014, 22:85-91.
29. Munteanu A, Solé RV. Phenotypic diversity and chaos in a minimal cell model. *J. Theor. Biol.*, 2006, 240(3):434-442.
30. Luisi PL, Stano P. Synthetic biology: minimal cell mimicry. *Nat. Chem.*, 2011, 3(10):755-756.
31. Fendler JH. Atomic and molecular clusters in

membrane mimetic chemistry. *Chem. Rev.,* 1987, 87(5):877–899.
32. Fendler J.H. Membrane-Mimetic Approach to Nanotechnology. "*Advances in the Applications of Membrane-Mimetic Chemistry*". New York, Springer, 1994, pp. 1-15.
33. Pidgeon C. Solid phase membrane mimetics: immobilized artificial membranes. *Enz. Micr. Tech.*, 1990, 12(2):149-150.
34. Fendler JH. Metallic and catalytic particles. *Adv. Polym. Sci.*, 1994, 113:96-118.
35. Fendler JH. Semiconductor particles and particulate films. *Adv. Polym. Sci.*, 1994, 113:118-159.
36. Fendler JH. Conductors and superconductors. *Adv. Polym. Sci.*, 1994, 113:159-171.
37. Fendler JH. Magnetism, magnetic particles, and magnetic particulate films in membrane-mimetic compartments. *Adv. Polym. Sci.*, 1994, 113:172-181.
38. Cope FW. Evidence for semiconduction in Aplysia nerve membrane. *Proc. Nat. Acad. Sci. USA*. 1968. 61(3):905-908.
39. Adam G. Electrical characteristics of the ionic psn-junction as a model of the resting axon membrane. *J. Membr. Biol.*, 1970, 3(1):291-312.
40. Rosenberg B, Pant HC. The semiconducting rectifier behaviour of a bimolecular lipid membrane. *Chem. Phys. Lipids.*, 1970, 4(2):203-207.
41. Gracheva ME, Vidal J, Leburton JP. p-n Semiconductor membrane for electrically tunable ion current rectification and filtering. *Nano Lett.*, 2007, 7(6):1717-1722.
42. Dragomir CT. Zone melting as a model for active transport across the cell membrane. *J. Theor. Biol.*, 1971, 31(3):453-468.
43. Tien HT. Semiconducting Photoactive Bilayer Lipid Membranes. *Solut. Behav. Surfact.*, 1982, 1:229-240.
44. Cope FW. Semiconduction as the mechanism of the cytochrome oxidase reaction. Low activation energy of semiconduction measured for cytochrome oxidase protein. Solid state theory of cytochrome oxidase predicts observed kinetic peculiarities. *Physiol. Chem. Phys.*, 1979, 11(3):261-262.
45. Kleman M., Lavrentovich OD. *Soft matter physics*. New York, Springer, 2003, 637 p.
46. Cope FW. Supramolecular biology: a solid state physical approach to ion and electron transport. *Ann. NY Acad. Sci.*, 1973, 204:416-433.
47. Resnati G, Boldyreva E, Bombicz P, Kawano M. Supramolecular interactions in the solid state. *Int. Un. Crystallogr. Journ.*, 2015, 2(6):675-690.
48. Haketa Y, Takayama M, Maeda H. Solid-state supramolecular assemblies consisting of planar charged species. *Org. Biomol. Chem.*, 2012, 10(13):2603-2606.
49. Borovkov VV, Harada T, Hembury GA, Inoue Y, Kuroda R. Solid-state supramolecular chirogenesis: high optical activity and gradual development of zinc octaethylporphyrin aggregates. *Angew. Chem. Int. Ed.*, 2003, 42(15):1746-1749.
50. Gibb BC. A solid-state supramolecular sweet spot. *Angew. Chem. Int. Ed.*, 2003,42(15):1686-1687.
51. Shiu KB, Lee HC, Lee GH, Ko BT, Wang Y, Lin CC. Solid-state supramolecular organization of supermolecules into a truly molecular zeolite. *Angew. Chem. Int. Ed.*, 2003, 42(26):2999-3001.
52. Cope FW. Solid state theory of competitive diffusion of associated Na+ and K+ in cells by free cation and vacancy (hole) mechanisms, with application to nerve. *Physiol. Chem. Phys.*, 1977, 9(4-5):389-398.
53. Cope FW. The solid-state physics of electron and ion transport in biology. *Adv. Biol. Med. Phys.*, 1970, 13:1-42.
54. Cope FW. Solid state physical mechanisms of biological energy transduction. *Ann. NY Acad. Sci.*, 1974, 227:636-640.
55. Cope FW. Solid state physical replacement of Hodgkin-Huxley theory. Phase transformation kinetics of axonal potassium conductance. *Physiol. Chem. Phys.*, 1977, 9(2):155-160.
56. Nishimura M. [Energy transfer in solid-state and membrane systems in photosynthesis]. Seikagaku. 1968, 40(8):347-356. (Art. in Japan).
57. Brunori M, Santucci R, Campanella L, Tranchida G. Membrane-entrapped microperoxidase as a 'solid-state' promoter in the electrochemistry of soluble metalloproteins. *Biochem. J.*, 1989, 264(1):301-304
58. Bando H, Hisada H, Ishida H, Hata Y, Katakura Y, Kondo A. Isolation of a novel promoter for efficient protein expression by Aspergillus oryzae

in solid-state culture. *Appl. Microbiol. Biotechnol.*, 2011, 92(3):561-569.
59. Ishida H, Hata Y, Kawato A, Abe Y. Improvement of the glaB promoter expressed in solid-state fermentation (SSF) of Aspergillus oryzae. *Biosci. Biotech. Biochem.*, 2006, 70(5):1181-1187.
60. Martin CR. Nanomaterials: a membrane-based synthetic approach. *Science*, 1994, 266(5193):1961-1966.
61. Cope FW. Biological sensitivity to weak magnetic fields due to biological superconductive Josephson junctions? *Physiol. Chem. Phys.*, 1973, 5(3):173-176.
62. Cope FW. Superconductivity - a possible mechanism for non-thermal biological effects of microwaves. *J. Microw. Power.*, 1976, 11(3):267-270.
63. Cope FW. On the relativity and uncertainty of distance, time, and energy measurements by man. (1) Derivation of the Weber psychophysical law from the Heisenberg uncertainty principle applied to a superconductive biological detector. (2) The reverse derivation. (3) A human theory of relativity. *Physiol. Chem. Phys.*, 1981, 13(4):305-311.
64. Cope FW. Enhancement by high electric fields of superconduction in organic and biological solids at room temperature and a role in nerve conduction? *Physiol. Chem. Phys.*, 1974, 6(5):405-410.
65. Cope FW. Discontinuous magnetic field effects (Barkhausen noise) in nucleic acids as evidence for room temperature organic superconduction. *Physiol. Chem. Phys.*, 1978, 10(3):233-246.
66. Cope FW. Preliminary studies of magnetic field facilitation of electric conduction in electrically switched "on" dye films that may be room-temperature superconductors. *Physiol. Chem. Phys.,* 1982, 14(5):423-430.
67. Maugh TH New organic superconductor. *Science.* 1984, 226(4670):37.
68. Crabtree GW, Carlson KD, Williams JM. Organic superconductor. *Science*, 1984, 226(4674):494.
69. Wudl F, Nalewajek D, Troup JM, Extine MW. Electron Density Distribution in the Organic Superconductor (TMTSF)2AsF6. *Science*, 1983, 222(4622):415-417.
70. Dunitz JD. Electron Density Distribution in the Organic Superconductor (TMTSF)2AsF6: Fact and Fancy. *Science*, 1985 Apr 19; 228(4697):353-354.
71. Marton JP. Conjectures on superconductivity and cancer. *Physiol. Chem. Phys.*, 1973, 5(3):259-270
72. Alexiou A, Rekkas J. Superconductivity in human body; myth or necessity. *Adv. Exp. Med Biol.*, 2015, 822:53-58.
73. Bystrov VS, Ovtchinnikova GI, Tazieva TR, Soloshenko AN, Pirogov YA, Novik VK. Bioferroelectricity and related problems: Hydrogen-bonded ferroelectric-like systems. *Ferroelectrics*, 2001, 258(1):79-88.
74. Bystrov V, Bystrova N. Bioferroelectricity and optical properties of biological systems. *Adv. Org. Inorg. Opt. Mat.*, 2003, 5122:132-136.
75. Bystrov VS. Models of proton dynamics and superprotonic/ionic conduction in hydrogen-bonded ferroelectrics and related (biological) systems. 1. Soliton dynamics in hydrogen-bonded systems. *Ferroelectrics Lett. Sec.*, 2000, 27(5-6):147-159.
76. Tuszynski JA., Craddock TJA, Carpenter EJ. Bio-ferroelectricity at the nanoscale. *J. Comput. Theor. Nanosci.*, 2008, 5(10):2022-2032.
77. Tokimoto T, Shirane K. Ferroelectric diffused electrical bilayer model for membrane excitation. *Ferroelectrics*, 1993, 141(1):297-305.
78. Leuchtag HR. Fit of the dielectric anomaly of squid axon membrane near heat-block temperature to the ferroelectric Curie-Weiss law. *Biophys. Chem.*, 1995, 53(3):197-205.
79. Tokimoto T Shirane K. Ferroelectric diffused electrical bilayer model for membrane excitation II. Voltage clamped responses. *Ferroelectrics*, 1993, 146(1):73-80.
80. Bdikin I, Bystrov V, Kopyl S, Lopes RPG, Delgadillo I, Gracio J, Mishina E, Sigov A, Kholkin AL. Evidence of ferroelectricity and phase transition in pressed diphenylalanine peptide nanotubes. *Appl. Phys. Lett.*, 2012, 100(4): 043702-1-043702-4.
81. Bystrov VS, Paramonova E, Bdikin I, Kopyl S, Heredia A, Pullar RC, Kholkin AL. Bioferroelectricity: diphenylalanine peptide nanotubes computational modeling and ferroelectric properties at the nanoscale. *Ferroelectrics*, 2012, 440(1):3-24.
82. Bystrov V, Bystrova N, Kisilev D, Paramonova

E, Kuhn M, Kleim H, Kholkin A. Molecular model of polarization switching and nanoscale physical properties of thin ferroelectric Langmuir-Blodgett P (VDF-TrFE) films. Integr. *Ferroelectrics*, 2008, 99(1):31-40.
83. Turina AV, Clop PD, Perillo MA. Synaptosomal membrane-based Langmuir-Blodgett films: a platform for studies on γ-aminobutyric acid type A receptor binding properties. *Langmuir,* 2015, 31(5):1792-1801.
84. Pavinatto FJ, Caseli L, Pavinatto A, dos Santos DS Jr, Nobre TM, Zaniquelli ME, Silva HS, Miranda PB, de Oliveira ON Jr. Probing chitosan and phospholipid interactions using Langmuir and Langmuir-Blodgett films as cell membrane models. *Langmuir*, 2007, 23(14):7666-7671.
85. Brosseau CL, Leitch J, Bin X, Chen M, Roscoe SG, Lipkowski J. Electrochemical and PM-IRRAS a glycolipid-containing biomimetic membrane prepared using Langmuir-Blodgett/ Langmuir-Schaefer deposition. *Langmuir*, 2008, 24(22):13058-13067.
86. Hill K, Pénzes CB, Schnöller D, Horváti K, Bosze S, Hudecz F, Keszthelyi T, Kiss E. Characterisation of the membrane affinity of an isoniazide peptide conjugate by tensiometry, atomic force microscopy and sum-frequency vibrational spectroscopy, using a phospholipids Langmuir monolayer model. *Phys. Chem. Chem. Phys.*, 2010, 12(37):11498-11506.
87. Kramarov SO, Dashko YV. Contribution of some relaxation processes to the fracture energy of segnetoelectric materials. *Strength of Materials*, 1987, 19(10):1384-1388.
88. Samoilovich MI, Rinkevich AB, Bovtun V, Belyanin AF, Kempa M, Nuzhnyy D, Tsvetkov MY, Kleshcheva SM. Optical, magnetic, and dielectric properties of opal matrices with intersphere nanocavities filled with crystalline multiferroic, piezoelectric, and segnetoelectric materials. *Russ. J. Gen. Chem.*, 2013, 83(11):2132-2147.
89. Leuchtag HR. Indications of the existence of ferroelectric units in excitable-membrane channels. *J. Theor. Biol.*, 1987. 127(3):321-340.
90. Leuchtag HR. Phase transitions and ion currents in a model ferroelectric channel unit. *J. Theor. Biol.*, 1987, 127(3):341-359.
91. Bystrov VS. Ferroeleciric phason model of sodium channels in biomemberanes. *Ferroelectr. Lett. Sect.*, 1992, 13(6):127-136.
92. Bystrov V, Rolov B, Yurkevich V. Photoferroelectric phenomena in ferroelectrics semiconductors caused by fluctuons and phasons. *Ferroelectrics*, 1984, 55(1):299-302.
93. Bystrov VS, Leuchtag HR. Bioferroelectricity: Modeling the transitions of the sodium channel. *Ferroelectrics,* 1994, 155(1):19-24.
94. Bystrov VS, Lakhno VD, Molchanov M. Ferroelectric active models of ion channels in biomembranes. *J. Theor. Biol.*, 1994, 168(4):383-393.
95. Bystrov VS. Ferroelectric liquid crystal models of ion channels and gating phenomena in biological membranes. *Ferroelectrics Lett. Sect.*, 1997, 23(3-4):87-93.
96. Leuchtag HR. Bioferroelectricity in models of voltage-dependent ion channels. *Ferroelectrics,* 2000, 236(1):23-33.
97. Leuchtag HR, Bystrov VS. Theoretical models of conformational transitions and ion conduction in voltage-dependent ion channels: Bioferroelectricity and superionic conduction. *Ferroelectrics*, 1999, 220(1):157-204.
98. Bystrov VS, Leuchtag H. R. Phase transitions in the ferroelectric-active model of ion channels of biomembranes. *Ferroelectrics,* 1996, 186(1):305-307.
99. Leuchtag HR. Do sodium channels in biological membranes undergo ferroelectric-superionic transitions? *IEEE 7th International Symposium on Applications of Ferroelectrics* (Urbana-Champaign, IL, 1990), p. 279-283.
100. Lomov AA, Shitov NV, Bushuev VA, Baranov AI. Structural phase transition in a surface layer of cesium deuterosulfate single crystals. *JETP Lett.*, 1992, 55(5):296-300.
101. Kirpichnikova LF, Polomska M, Volyak Y, Hilczer B. On the characteristic changes in the domain structure and conductivity of $CsDSO_4$ crystals near the superionic phase transition. *JETP Lett.*, 1996, 63(11):912-916.
102. Wozniak MA, Chen CS. Mechanotransduction in development: a growing role for contractility. *Nat. Rev. Molec. Cell Biol.*, 2009, 10:34-43.
103. Bourgine P., Lesne A. (Eds.) *Morphogenesis: Origins of Patterns and Shapes*. Heidelberg, Springer Science & Business Media, 2011, 346 p.

104. Rolov B, Ivin V, Lorencs Y. Physics of ferroelectric liquids. *Ferroelectrics*, 1984, 55(1):159-162.
105. Klapp S, Forstmann F. Stability of ferroelectric fluid and solid phases in the Stockmayer model. *EPL* (*EuroPhysics Letters*), 1997, 38(9):663-668.
106. Petschek RG, Wiefling KM. Novel ferroelectric fluids. *Phys. Rev. Lett.*, 1987, 59(3): 343-346.
107. Clark NA, Lagerwall ST. Physics of ferroelectric fluids: the discovery of a high-speed electro-optic switching process in liquid crystals. *Recent Developments in Condensed Matter Physics*, 1981, 4:309-319.
108. Cantillon-Murphy P, Wald LL, Adalsteinsson E, Zahn M. Heating in the MRI environment due to superparamagnetic fluid suspensions in a rotating magnetic field. *J. Magn. Magn. Mater.*, 2010, 322(6):727-733.
109. King LB, Meyer E, Hopkins MA, Hawkett BS, Jain N. Self-assembling array of magnetoelectrostatic jets from the surface of a superparamagnetic ionic liquid. *Langmuir,* 2014, 30(47):14143-14150
110. Hartmann P, Donkó Z, Rosenberg M, Kalman GJ. Waves in two-dimensional superparamagnetic dusty plasma liquids. *Phys. Rev. E: Stat. Nonlin. Soft Mat. Phys.*, 2014, 89(4):043102-1-043102-9.
111. Tokimoto T, Shirane K, Kushibe H. Self-organized chemical model and approaches to membrane excitation. *Ferroelectrics*, 1999, 220(1):273-289.
112. Cope FW. A theory of ion transport across cell surfaces by a process analogous to electron transport across liquid-solid interfaces. *Bull. Math. Biophys.*, 1965, 27:99-109.

Градов Олег Валерьевич
к.ф.-м.н., с.н.с.
Институт энергетических проблем химической физики им. В.Л. Тальрозе РАН
38/2, Ленинский просп., 119334 **Москва, Россия**
o.v.gradov@gmail.com

CAN GRAPHENE BILAYERS BE THE MEMBRANE MIMETIC MATERIALS?

Oleg V. Gradov

Institute of Energy Problems of Chemical Physics, Russian Academy of Sciences, http://www.inepcp.ru
38/2, Leninskii prosp., 119334, Moscow, Russian Federation
gradov@chph.ras.ru

Abstract. **Since the pioneering works of the founder of membrane mimetic chemistry Janos H. Fendler it is known that a number of atomic or molecular clusters and films (including nanoscale ones) are capable of mimicking the membrane functions. Membrane mimetic materials can be either soft matter or solid state materials. Conducting films (including those with magnetic properties) and semiconductors are also known to possess membrane mimetic properties. If we consider the agent exchange through the membrane in the operator form, the chemical composition of the membranes and their models, as well as the difference between the atomic and molecular clusters or layers become not so essential, and hence, membrane mimetic chemistry of nano- and mesostructures do not differ significantly within the agent-based approach. This invited review containing several parts reflects the main aspects of the author's report at the conference "Graphene": a molecule and 2D-crystal" (September 8-12, 2015, Novosibirsk, Russia) and considers various aspects of the similarity between the graphene nanostructures, membranes and bionic membrane-like nanomaterials.**

Keywords: **bilayer graphene, bilipid layers, membrane mimetics, nanobionics**

PACS: 81.05.ue

Bibliography – 112 references *Received 16.06.2016*

RENSIT, 2016, 8(1):25-38 **DOI: 10.17725/rensit.2016.08.025**