

## О Т З Ы В

**Официального оппонента** на диссертационную работу Большина Даниила Сергеевича "Электрокинетические явления в потоке электролита на поверхности гидрогеля как основа источника электроэнергии для имплантируемых устройств", представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.8 – Физика конденсированного состояния

Актуальность темы диссертации Большина Д.С. не вызывает сомнений. Вопрос о пролонгации срока службы источников тока для имплантируемых медицинских устройств стоит весьма остро. Действительно, в настоящее время в этих целях повсеместно и чаще всего используются литий-иодные одноразовые гальванические элементы. В отличие от аналогов, они характеризуются отсутствием внутри корпуса токсичных для организма веществ, повышенных давлений и других потенциальных факторов риска. Однако срок их службы хотелось бы увеличить, поскольку замена "севшего" источника тока подразумевает необходимость повторной операции. В настоящее время даже теоретический срок службы данных источников тока не превышает 10 лет. Альтернатив этим источникам тока не слишком много. Некоторые другие одноразовые гальванические элементы также с литиевым анодом и рядом иных окислителей для катода тоже используются. Но в этих случаях речь идет скорее не столько об увеличении срока службы, сколько об увеличении мощности, что необходимо для ряда современных дизайнов имплантируемых устройств. Беспроводные способы зарядки аккумуляторов прямо в организме пациента, несмотря на значительную историю исследований (с 1958 года), все еще пока в полной мере не отработаны. Достаточно интересным опытом было использование для питания имплантируемых устройств радиоизотопных источников энергии на основе способного к  $\alpha$ -распаду плутония-238 в сочетании с термоэлектрическим генератором. Т.е. это тот же самый дизайн, который использовался в покинувших солнечную систему Вояджерх, используется в марсоходах различных серий и т.п. Однако радиофобия населения и необходимость получения лицензий от национальных правительств для работы с плутонием не оставляют шанса этой альтернативе.

Поэтому поиск путей использования внутренних энергетических ресурсов организма для питания имплантируемых устройств остается по-прежнему актуальным. В работе автора для этих целей используются электрокинетические явления.

Таким образом, объектом исследования в настоящей работе является электрокинетический эффект, а точнее, обратный более известному электроосмосу эффект *Квинке*, состоящий в возникновении потенциала потока. Для выявления возможности конверсии перепада давлений в кровотоке в электродвижущую силу источника электрического тока в организме автором был разработан дизайн конвертирующих устройств, основанный на использовании гидрогелей и электропроводящих полимеров. Таким образом,

эти объекты также находятся в фокусе исследований работы. Изучаются вопросы контактного сопротивления, динамические процессы, связанные с режимом установления разности потенциалов в потоке, отклик гидрогелей на изменение условий, их спектральные характеристики и т.п.

Диссертация представляет собой законченное исследование, в котором автором предложен и создан прототип устройства, конвертирующего потенциал потока в разность потенциалов. Оригинальным подходом является сочетание использования электропроводящих полимеров и мягких гидрогелей для обеспечения биосовместимости с тканями организма. Изучены сопутствующие эффекты отклика гидрогелей на внешнее воздействие, снижения контактного сопротивления за счет привнесения проводящих полимеров. Исследованы переходные процессы установления потенциала потока, характеризующиеся гистерезисом. Развита методика комбинационного рассеяния света для анализа спектральных характеристик объектов исследования.

Интересным и важным для практических приложений экспериментальным результатом является реально продемонстрированная возможность отбирать с источника тока некоторую, хотя и небольшую, мощность. Другими результатами являются: детектированное снижение контактного сопротивления из-за присутствия проводящего полимера, продемонстрированное наличие переходного процесса установления разности потенциалов из-за потенциала потока, обнаруженный эффект запасения электроэнергии за счет установления градиентов приэлектродных состояний. Автором также развита методология анализа степени окисления проводящего полимера с помощью комбинационного рассеяния света.

Диссертант является соавтором трех публикаций в изданиях, индексируемых Web of Science, Scopus, RSCI, еще одной публикации в "Ученых записках физического факультета", одной главы в коллективной монографии, а также двух патентов на программное обеспечение. Поэтому можно утверждать, что результаты работы прошли верификацию, во-первых, рецензентами опубликованных статей, во-вторых, научным сообществом после факта опубликования. Это подтверждает достоверность результатов, полученных в оппонированной работе.

Новизна работы обусловлена оригинальностью дизайна прототипа источника тока, сочетающего проводящий полимер с гидрогелем, что позволило оптимизировать некоторые аспекты его работы.

Таким образом, можно констатировать, что полученные результаты характеризуются новизной, оригинальностью и приоритетностью, экспериментальные данные опубликованы в рецензируемых изданиях. Кроме того, они представлены на трех научных конференциях. Достоверность результатов обусловлена выбором надлежащих методик исследования и совпадением результатов с литературными данными, полученными для

других сходных объектов. Можно утверждать, что выводы, заключение и положения работы являются обоснованными.

**Практическая значимость** диссертации состоит в разработке работоспособной концепции конвертирования энергии потока крови в электродвижущую силу, что проиллюстрировано в успешной работе прототипа.

Автором сделан существенный вклад в развитие методов практического использования потенциала потока для питания имплантируемых медицинских устройств.

Диссертация, изложенная с приложением на 146 стр. (126 источников в списке литературы, 45 рисунков основной части + 18 рисунков приложения, 9 таблиц основной части + 3 таблицы приложения), состоит из Введения, Литературного обзора в области источников энергии для имплантируемых устройств (Глава 1), Экспериментальной части (Глава 2, с изложением сведений об использованных материалах и методах эксперимента), главы с изложением оригинальных результатов (Глава 3, раздел 1 про исследование поведения гидрогелей в воде и в физиологическом растворе, раздел про структурные особенности получаемых гидрогелей, раздел 3 про их электрофизические свойства, раздел 4 про исследование электрокинетического эффекта), а также Приложения, где приведены дополнительные материалы (схемы, дополнительные результаты, числовые данные).

Во Введении изложены: актуальность работы, объект исследования, предмет исследования, цель и задачи работы, положения, выносимые на защиту, научная новизна исследования, теоретическая и практическая значимость, обоснованность и достоверность результатов, личный вклад автора, апробация работы, публикации, структура и объем диссертации. В Литературном обзоре (Глава 1) даны общие сведения об источниках энергии для имплантируемых устройств. Ставится и обосновывается проблема создания источника тока для имплантируемых устройств. Излагаются общие сведения о существующих источниках тока. Дано представление об источниках тока, работа которых основана на электрокинетических явлениях. Раскрывается роль двойного электрического слоя и излагаются известные из литературы подходы конвертирования протекания процессов массопереноса в возникновение разности потенциалов. Даны общие сведения о структуре и свойствах гидрогелей, а также методах их получения. Описаны свойства электропроводящих полимеров. Ставится задача исследования.

В Экспериментальной части (Глава 2) и оригинальной главе (Глава 3) дано описание использованных материалов и методов исследования, включая сборку прототипа источника тока, излагаются оригинальные результаты автора, и дается их обсуждение.

В качестве замечаний по диссертации следует отметить следующее:

1. На стр. 21 приводится формула (1) для потенциала потока. Поскольку удельная электропроводность электролита не требует оговорки, что она на единицу поперечного сечения, и имеет размерность [сименс/метр], то в формуле, по-видимому, присутствует

ошибка в размерности. Кроме того, следовало бы использовать эту формулу для хотя бы грубой оценки ожидаемого эффекта в условиях эксперимента, подставив вязкость крови, электропроводность крови, радиус канала, ожидаемый перепад давлений и т.п.

2. Утверждается, что критерием выбора параметрических моделей: функций или эквивалентных схем, является "максимально точное описание экспериментальных данных". Однако при решении обратных задач чрезмерным введением дополнительных параметров в аппроксимирующую функцию или усложнением эквивалентной схемы действительно можно улучшить аппроксимацию, но при этом либо потерять устойчивость решения к погрешности входных данных, либо потерять физический смысл самих вводимых параметров/элементов. Поэтому критерием должно служить скорее приемлемое описание экспериментальных данных при сохранении физического смысла параметров/элементов и стабильности решения обратной задачи.

3. Следствием замечания 2 является претензия о выборе трехпараметрической функции Хилла для анализа экспериментальных данных по набуханию. Экспериментальные графики на рис. 25 можно было бы описать и в рамках стандартных моделей диффузии в полимерах с коэффициентом диффузии, зависящим от концентрации, в сочетании с релаксацией либо границы, либо матрицы в целом. Достоинством такого подхода служила бы легкость верификации полученных решений сравнением с известными литературными данными по ранее полученным значениям коэффициентов диффузии в полимерах.

4. Следствием замечания 2 является также претензия о выборе трехпараметрической гиперболической функции для описания зависимости сорбции от концентрации соли на рис. 26. Непонятно, почему была взята именно эта функция в отрыве от литературных данных.

5. Следствием замечания 2 является также претензия о выборе элементов эквивалентных схем: порой их слишком много и их физический смысл неочевиден (например, на рис. 19).

6. На стр. 83 обсуждаются изменения степени набухания гидрогеля в присутствии низкомолекулярной соли одновалентных ионов. Но при этом предлагаемые интерпретации никак не сопоставляются с известными литературными экспериментальными данными и теоретическими моделями для таких систем.

7. Среди мелких замечаний можно отметить, что полистирол назван полистиреном; суспензии названы взвесями порошков; нижняя граница толщины двойного электрического слоя указана как доли микрометров, в то время как это ангстремы; желатин назван полисахаридом, в то время как это белок; в конце работы не сформулированы итоговые Выводы.

Но выявленные и отмеченные недочеты носят скорее характер погрешностей и на общую оценку работы не влияют.

### Заключение по работе

Диссертация представляет собой законченную, самостоятельную и логически цельную (обладающую внутренним единством) научно-исследовательскую работу на актуальную тему. Научные результаты, полученные диссертантом, являются новыми, оригинальными, опубликованными под соавторством диссертанта, могут быть использованы на практике и свидетельствуют о важном личном вкладе автора в физику конденсированного состояния вещества. Выводы и рекомендации работы обоснованы. Основные научные результаты диссертации изложены в публикациях. Автореферат в полной мере отражает содержание диссертации.

Диссертация отвечает требованиям, установленным Московским государственным университетом имени М.В. Ломоносова к работам подобного рода. Содержание диссертации соответствует специальности 1.3.8 Физика конденсированного состояния (по физико-математическим наукам) по направлению 1, а также критериям, определенным пп. 2.1-2.5 Положения о присуждении ученых степеней в Московском государственном университете имени М.В. Ломоносова. Диссертация оформлена согласно требованиям Положения о совете по защите диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова.

Таким образом, автор, Большин Даниил Сергеевич, заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.8 – Физика конденсированного состояния.

Официальный оппонент,

доктор физ.-мат. наук по специальности 02.00.06. - высокомолекулярные соединения,

доцент по специальности "Высокомолекулярные соединения",

профессор РАН по отделению химии и наук о материалах,

профессор кафедры физики полимеров и кристаллов

физического факультета

ФГБОУВО «Московский государственный

университет имени М.В. Ломоносова»,

119991, Ленинские горы д. 1 стр. 2,

тел.: +7(495)9391430,

эл. почта: [glm@spm.phys.msu.ru](mailto:glm@spm.phys.msu.ru)

веб-сайт: [www.phys.msu.ru](http://www.phys.msu.ru)

Галлямов Марат Олегович

06 июля 2023г.

доктор физ.-мат. наук, профессор,

и.о. декана физического факультета

МГУ имени М.В. Ломоносова