



НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ЦЕНТР
«КУРЧАТОВСКИЙ ИНСТИТУТ»

Направление подготовки: 03.06.01, Физика и астрономия
Направленность (профиль) подготовки: 03.01.02, Биофизика
Форма обучения: очная

Допущен к ГИА
Руководитель научно-тематического семинара
_____/ Васильев Р. Г.
(подпись) (расшифровка подписи)
« 29 » 06 2020 г.

НАУЧНЫЙ ДОКЛАД
ОБ ОСНОВНЫХ РЕЗУЛЬТАТАХ ПОДГОТОВЛЕННОЙ
НАУЧНО-КВАЛИФИКАЦИОННОЙ РАБОТЫ (ДИССЕРТАЦИИ)

«Генерация электрического тока в биоэлектрохимических системах сопряженных с фотобиореактором»

Аспирант: Вишневская Мария Владиславовна

(подпись аспиранта)

Научный руководитель:

Готовцев Павел Михайлович,

к.т.н.,

заместитель начальника отдела

(подпись научного руководителя)

Москва, 2020

1. ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы исследований.

Биотопливные элементы (БТЭ) уже более 100 лет изучаются в качестве получения электроэнергии за счет работы живых систем, однако активное их изучение началось в конце XX века. Они преобразовывают химическую энергию в электрическую, тем самым выступая в качестве экологического источника тока. БТЭ имеют перспективу для применения их в качестве источников энергии в медицинских имплантируемых устройствах. Также БТЭ могут использоваться для очистки сточных вод за счет переработки весомой части органических веществ живыми микроорганизмами, которые есть в составе БТЭ (в данном случае, речь идет о микробном топливном элементе).

В общем БТЭ можно поделить на два больших типа: ферментные (ФТЭ) и микробные (МТЭ). Довольно часто используемыми и модельными являются их представители, соответственно: глюкозооксидаза и *Gluconobacter Oxydans*. Данные биокатализаторы удобны в применении из-за своей широкой субстратспецифичности и активной работы при нормальных условиях. Все же до сих пор БТЭ не нашли массовое применение на практике, так как стоимость энергии, генерируемой БТЭ, из-за ряда компонентов конструкции (мембрана, медиатор, электрод) уступает традиционным видам получения энергии. Соответственно ведутся поиски оптимальных материалов для увеличения эффективности топливных элементов, снижения стоимости генерируемой ими электроэнергии и поиска областей для их применения. Таким образом, с одной стороны сегодня активно ведутся поисковые и прикладные исследования, направленные на создание новых, практически применимых БТЭ, а с другой значительное внимание уделяется фундаментальным вопросам транспорта электронов от биокатализатора на материал электродов, изучению процессов на аноде и катоде в различных условиях и поиске новых фундаментальных подходов к повышению эффективности БТЭ. Среди таких вопросов, актуальным является изучение процессов, протекающих в микробном БТЭ без использования протонообменной мембраны, так как высокая стоимость последней, не позволяет

создавать крупные высокомоощные системы для очистки сточных вод с генерацией электроэнергии. Кроме того, по-прежнему важнейшими направлениями исследований являются изучение безмедиаторного переноса заряда с микроорганизмов на материал электрода, с учетом особенностей всего БТЭ, исследования, направленные, на повышение эффективности катодных процессов, в том числе за счет интеграции катода с фотосинтезирующими организмами.

Таким образом, актуальность исследования обусловлена современными тенденциями, направленными на широкое внедрение БТЭ в практику, и фундаментальными задачами, связанными с этим, а именно процессами, протекающими на электродах в безмембранной безмедиаторной ячейке, и подходами по повышению эффективности катодного процесса за счет интеграции его с фототрофными организмами.

Цель научно-квалификационной работы (диссертации).

Целью данной работы является изучение генерации электрического тока в биоэлектрохимических системах сопряженных с фотобиореактором.

Для достижения цели были поставлены следующие задачи:

- Разработать методику иммобилизации биокатализатора на материал электрода;
- Выбрать наиболее подходящий материал для электродов, способный обеспечить максимальную мощность БТЭ и соответствовать всем необходимым требованиям, применяемым к электродам для БТЭ;
- Провести исследования по изучению безмедиаторного переноса заряда с биокатализатора на анод;
- Провести исследования по изучению безмембранного переноса заряда с биокатализатора на катод;
- Определить энергетические характеристики изучаемого экспериментального образца БТЭ, совмещенного с фотобиореактором и оценить возможности использования такого варианта БТЭ в очистке сточных вод.

Научная новизна.

Разработана методика закрепления биокатализатора на материале анода с помощью поли (этиленгликоль) диглицидилового эфира (PEGDE). Также повышена электропроводность, благодаря добавлению проводящего полимера поли(3,4-этилендиокситиофен) легированный полистиролсульфонатом (PEDOT:PSS).

Исследована работа БТЭ в условиях безмедиаторного и безмембранного переноса заряда с биокатализатора на анод. При использовании разработанной методики закрепления, продемонстрирована возможность безмедиаторного переноса заряда с бактериальных клеток и с ферментов на материал электрода.

Впервые исследование было направлено на изучение генерации электрического тока в экспериментальном образце БТЭ, совмещенном с фотобиореактором.

Практическая значимость работы.

Разработан действующий экспериментальный образец биотопливного элемента на основе бактериальных клеток *Gluconobacter oxydans*, без использования медиатора электронного переноса и протонообменной мембраны, сопряженный с лабораторным фотобиореактором, являющимся катодной камерой ячейки.

Результаты данной работы дают почву для исследований, направленных на применение фотобиотопливных элементов в качестве устройств, утилизирующих органические отходы сточных вод и вырабатывающих электричество, которое, в свою очередь, может быть направлено на самообеспечение очистных сооружений.

Положения, выносимые на публичное представление:

1. Безмедиаторный и безмембранный микробный БТЭ, устойчиво генерирующий электрический ток, утилизируя органические примеси в сточных водах;
2. Демонстрация передачи заряда с биокатализатора на электроды, сделанные из различных материалов, через электропроводящий полимер PEDOT:PSS;

3. Показано, что добавление в катодный отсек БТЭ фототрофных микроорганизмов приводит к росту мощности БТЭ;

4. Новый метод иммобилизации биокатализаторов, с использованием комбинации PEDOT:PSS и PEGDE, который позволяет обеспечить прямой перенос энергии с бактериальных клеток и фермента на электрод.

Личный вклад автора.

Научные результаты, обобщённые в научно-квалификационной работе Вишневской М.В., получены ей самостоятельно либо при ее активном участии на базе лаборатории Отдела биотехнологий и биоэнергетики Курчатовского комплекса НБИКС-природоподобных технологий НИЦ «Курчатовский институт». Автором самостоятельно проведен сбор и анализ отечественной и зарубежной литературы по изучаемой теме. В ходе изложенных в работе исследований автор участвовал в постановке задач исследований и выборе методов их решения; планировании и проведении экспериментов по разработке методики конструирования БТЭ с использованием микробных и ферментных биокатализаторов, совмещенным с фотобтореактором, а также по изучению процессов переноса заряда с биокатализатора на катод с целью получения электрического тока. Вишневская М.В. приняла непосредственное участие в анализе, обработке, интерпретации полученных результатов и подготовке статей к публикации.

Достоверность результатов.

Достоверность полученных результатов обеспечивается как использованием современных физико-химических методов исследования так и применением современных методик анализа и обработки результатов измерений.

Апробация работы.

Основные результаты научно-квалификационной работы были представлены на следующих конференциях:

61-я Всероссийская научная конференция МФТИ (г. Москва, 2018 г.)

IEEE 12th International Conference Developments in e-Systems Engineering – 2019 (г. Казань, 2019 г.)

62-я Всероссийская научная конференция МФТИ (г. Москва, 2019 г.)

XVI Курчатовская междисциплинарная молодежная научная школа (г. Москва, 2019 г.)

Публикации.

Основное содержание исследования представлено в 1 патенте и 6 статьях, входящих в перечень рецензируемых научных журналов и изданий для опубликования основных научных результатов диссертаций, рекомендованных ВАК Минобрнауки России, и в реферируемые базы данных Scopus и Web of Science.

Структура научно-квалификационной работы (диссертации).

Научно-квалификационная работа изложена на 77 страницах и содержит 14 рисунков, 1 таблицу и 138 источников литературы. Структура изложения включает введение, обзор литературы (глава 1), экспериментальную часть (глава 2), обсуждение результатов (главы 3), выводы и список использованных источников.

2. ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** отражена актуальность темы, научная новизна и практическая значимость, сформулированы цель и задачи работы, приведены положения, выносимые на публичное представление, степень достоверности и апробация результатов.

В **литературном обзоре** дан анализ научно-технической литературы, посвященной исследованиям в области технологии БТЭ, а именно рассмотрена работа ферментных и микробных топливных элементов, их преимущества и недостатки по сравнению с аналогами и друг с другом, а также особенности биокаталитических реакций в фото-микробных топливных элементах. Проанализированы работы по применению фермента глюкозооксидазы и

бактерий *Gluconobacter Oxydans* в биотопливных элементах. Показана практическая значимость фото-микробных топливных элементов для применения в очистке сточных вод.

В экспериментальной части приведено описание используемых реактивов, материалов для электродов, приборов, растворов и сред, выделены методики культивирования бактерий *Gluconobacter Oxydans* и фототрофных микроорганизмов *Chlorella vulgaris* и *Euglena gracilis*. Перечислены основные методы и методики исследования, такие как: синтез гелевых электродов, приготовление солевого мостика, иммобилизация биокатализаторов на аноды, подготовка ячейки биотопливного элемента, подготовка ячейки биотопливного элемента совмещенного с фотобиореактором, микроскопирование гелевых электродов, изучение механических свойств гелевых электродов, вольт-амперометрические измерения, математическое моделирование. Описана последовательность проводимых экспериментов.

Электрохимические измерения проводили с помощью потенциостата IPC Micro и потенциостата-гальваностата Autolab PGSTAT204 (Mertohm) (ПО NOVA 2.0) с программным управлением.

В работе исследован безмедиаторный фото-микробный топливный элемент, совмещенный с лабораторный фотобиореактором для культивирования микроводорослей *Chlorella vulgaris*, с использованием бактерий *Gluconobacter Oxydans* в качестве биокатализатора. Показана возможность применения биотопливного элемента, совмещенного с фотобиореактором для очистки городских сточных вод.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

3.1 Изучение процесса переноса заряда с биокатализатора на катод в микробном топливном элементе (МТЭ)

Для разработки БТЭ важной задачей является иммобилизация биокатализатора на материале электрода. В качестве матрицы для иммобилизации бактериальных клеток *Gluconobacter Oxydans* в работе использован полимер поли(этиленгликоль) диглицидиловый эфир (PEGDE). Данный полимер отличается механической и химической устойчивостью, нетоксичностью для бактерий и способностью удерживать их на электроде длительное время. Для увеличения электропроводности анода был добавлен органический полимер поли(3,4-этилендиокситиофен) легированный полистиролсульфонатом (PEDOT:PSS), который обладает такими свойствами, как: биосовместимость, нетоксичность, биоразлагаемость, а также высокая электропроводимость. Поэтому он является хорошим материалом для использования в составе электрода.

После нанесения на материал анода суспензии из бактериальных клеток *Gluconobacter Oxydans* и обоих полимеров электрод высушивался при комфортной для микроорганизмов температуре. Сразу после просушки анод был готов к использованию в экспериментах.

Такая технология иммобилизации биоматериала позволяла надежно закрепить его на электроде и быть уверенным, что на протяжении всего времени планируемых экспериментов биокатализатор будет оставаться на месте. Также отмечается проста и доступность в изготовлении, что является неоспоримым плюсом в подготовке электродов БТЭ.

Эксперименты по изучению процесса переноса заряда с биокатализатора на катод в МТЭ проводились в открытой безмембранной ячейке. В качестве субстрата использовался 5%-ный раствор глюкозы (1,5 % от объема электролита) в К-фосфатном буфере.

Подбирались разные соотношения для компонентов наносимой смеси на анод (*Gluconobacter Oxydans*, PEDOT:PSS, PEGDE). В итоге соотношение компонентов 4:1:1 являлось оптимальным и использовалось во всех последующих экспериментах.

Для получения вольт-амперных характеристик использовали двухэлектродную электрохимическую ячейку, соединенную с потенциостатом

IPС-Micro. Эксперименты проводились в условиях задаваемой разности потенциалов от -300 мВ до +300 мВ и обратно до -300 мВ.

В результате изучения циклических вольтамперных характеристик работы ячейки БТЭ было выявлено, что ячейка с составом компонентов наносимой на анод смеси 4:1:1 генерирует большую удельную мощность по сравнению с ячейкой с составом компонентов 2:1:1, в 5 раз, что составляет 0,251 мкВт/см² относительно 0,052 мкВт/см².

3.2 Изучение процесса переноса заряда с биокатализатора на анод в безмембранных ФМТЭ с добавлением фотосинтезирующих цианобактерий

Использование фотосинтезирующих микроводорослей в составе безмембранной ячейки БТЭ является положительным применением, поскольку генерация дополнительного кислорода фототрофными микроорганизмами повышает скорость реакций, происходящих на катоде, что в свою очередь снижает ингибирование протонами процессов, происходящих на аноде.

Эксперименты по изучению процесса переноса заряда с биокатализатора на катод в ФМТЭ проводились в открытой безмембранной ячейке. В качестве субстрата использовался 5%-ный раствор глюкозы (1,5 % от объема электролита) в К-фосфатном буфере, и для сравнения такой же, но с добавлением суспензии фототрофных микроорганизмов *Euglena gracilis*. Для измерений использовали двухэлектродную электрохимическую ячейку, соединенную с потенциостатом IPС-Micro. Ячейку попеременно укрывали от света и наоборот освещали, при этом снимая показания тока без перерыва.

В результате изучения вольтамперометрических измерений работы ячейки ФБТЭ было подтверждено предположение о том, что генерируемый ток в ячейке с фототрофными микроорганизмами с применением освещения будет больше, чем в обычной ячейке. Данные результаты подтверждаются значениями максимального генерируемого ячейкой тока в случае с фото-МТЭ – 9,5 мкА, обычным МТЭ – 6 мкА, что больше примерно на 35%.

3.3 Сравнение работы разных электродных материалов

Для эффективной работы БТЭ одним из важных критериев является грамотно подобранный материал электрода. Он должен соответствовать следующим условиям: высокая электропроводность, высокая удельная площадь поверхности, биосовместимость, химическая устойчивость, механическая прочность, низкая стоимость, доступность и простота в изготовлении.

Углеродные материалы широко используются для изготовления электродов БТЭ из-за их высокой химической и механической стабильности, высокой электропроводности, биосовместимости с живыми организмами, нетоксичности и хорошей кинетики переноса электронов. Данные материалы дешевле большинства альтернативных материалов для электродов БТЭ.

В данной работе проводилось исследование, в ходе которого сравнивались мощностные характеристики БТЭ с различными вариантами материалов электродов.

Во всех экспериментах в качестве биокатализатора использовали фермент глюкозооксидазу. Для измерений использовали двухэлектродную электрохимическую ячейку, соединенную с потенциостатом IPC-Micro. Эксперименты проводились в условиях задаваемой разности потенциалов от -300 мВ до +300 мВ и обратно до -300 мВ.

Сравнивались следующие материалы: Ni пластина, графитовый стержень, гель (CRG, PVA, PEDOT:PSS), закрепленный на Ni подложке, и углеродная ткань. На все образцы электродов, кроме геля, наносилась смесь (фермент глюкозооксидаза, PEGDE и PEDOT:PSS). На гелевом электроде находился только фермент глюкозооксидаза.

Наибольшие показатели выходной мощности были достигнуты у ячейки БТЭ с использованием углеродной ткани в качестве материала электрода, которая составила $9,532 \text{ мкВт/см}^2$.

3.4 Проверка закрепления биокатализатора на гелевых электродах

Проводились исследования по закреплению бактериальных клеток *Gluconobacter Oxydans* и фермента глюкозооксидаза в структуру геля.

Биокатализаторы добавлялись в процессе приготовления гелей после полного смешивания составляющих гелей и в момент остывания растворов гелей минимум до температуры 30 °С для бактериальных клеток *Gluconobacter Oxydans* и 37 °С для фермента глюкозооксидаза, соответственно (максимальные температуры, при которых данные биокатализаторы сохраняют активность жизнедеятельности).

Проверка прочности гелевого электрода тестировалась в режиме одноосного растяжения на универсальной испытательной машине Instron 5965 с датчиком статической нагрузки ± 50 Н. Скорость движения зажимов была постоянной. Размер рабочей части образца составлял 10×3,25 мм, тестовая скорость составляла 1 мм/мин. Перед испытанием образцы выдерживали в физиологическом растворе в течение 2 часов (до достижения равновесия) при комнатной температуре (25 °С).

Проверка закрепления биокатализатора на геле проводилась на сканирующем электронном микроскопе (SEM) Versa 3D DualBeam в режиме SEM окружающей среды (ESEM). Изображения были получены с помощью детектора газообразных вторичных электронов (GSED) с ускоряющим напряжением 10 кВ и током 60 пА. Образцы размещали на элементе Пельтье, который предварительно охлаждали до 3°С. Во время эксперимента влажность в вакуумной камере постоянно снижалась со 100% до 60% для выявления микроструктуры образцов.

На фотографиях ниже представлены 2 образца геля: с бактериальными клетками *Gluconobacter Oxydans* (рисунок 1а) и ферментом глюкозооксидаза (рисунок 1б).

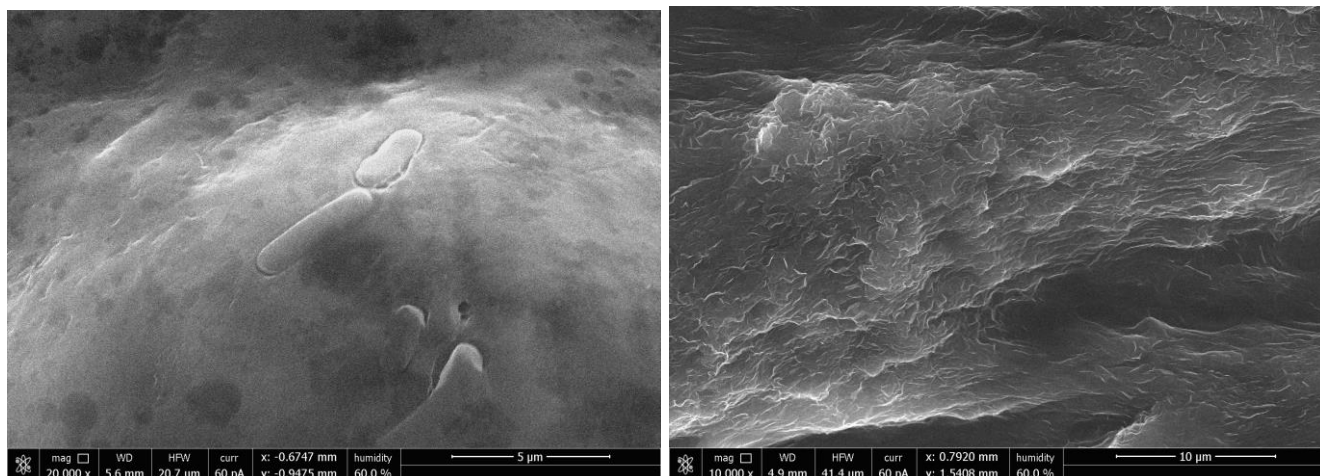


Рисунок 1. Фотография SEM геля с биокатализаторами: а) бактериальные клетки *Gluconobacter Oxydans*; б) фермент глюкозооксидаза.

На рисунке 1а наглядно показано, что бактерии не просто находятся на поверхности геля, а именно закрепились в его структуре.

На рисунке 1б хорошо видна пористая структура геля. Фермент также закрепился в структуре геля. Это подтверждается экспериментальными данными, где были получены высокие показания тока.

Из чего можно сделать вывод, что пористая структура гелей подходит для использования их в качестве материала для электродов. Гели являются перспективным материалом для изучения, так как за счет пористости увеличивается удельная площадь поверхности электрода.

3.5 Изучение процесса переноса заряда с биокатализатора на анод в ФМТЭ совмещенного с фотобиореактором

Загрязнение воды является глобальной проблемой. В то же время сточные воды могут рассматриваться, как источник в качестве субстрата для выработки энергии микроорганизмами. Современные методы очистки имеют высокое электропотребление, также после такой очистки воды не избежать большого количества остаточных загрязнений.

Технология БТЭ, как альтернативного источника энергии, является потенциальной в роли удаления загрязняющих веществ сточных вод и одновременной выработке электроэнергии. МТЭ способны справиться с такой

задачей. При этом остаточных загрязнений, по сравнению с традиционными технологиями очистки, не так много и отсутствует энергозатрата на аэрацию.

Изучение процесса переноса заряда с биокатализатора на катод в ФМТЭ проводилось с использованием графитовых стержней в качестве материала электродов, при этом катодная камера представляла собой лабораторный фотобиореактор для культивирования фототрофных микроводорослей *Chlorella vulgaris*. Лабораторный ФБР представлял собой емкость прямоугольной формы, изготовленную из оргстекла с углублением с одной стороны под барботирование и нишей внизу для расположения магнитной мешалки. Крышка съемная, освещение 700 люкс с помощью светодиодов.

Для измерений использовали двухэлектродную электрохимическую ячейку, соединенную с потенциостатом-гальваностатом Autolab PGSTAT204 (Mertohm) (ПО NOVA 2.0). Эксперименты проводились в условиях задаваемой разности потенциалов от -300 мВ до +300 мВ и обратно до -300 мВ.

В результате изучения циклических вольтамперных характеристик работы ячейки ФМТЭ, совмещенным с лабораторным фотобиореактором, была достигнута наибольшая удельная мощность, которая составила $0,036 \text{ мВт/см}^2$ (рисунок 2).

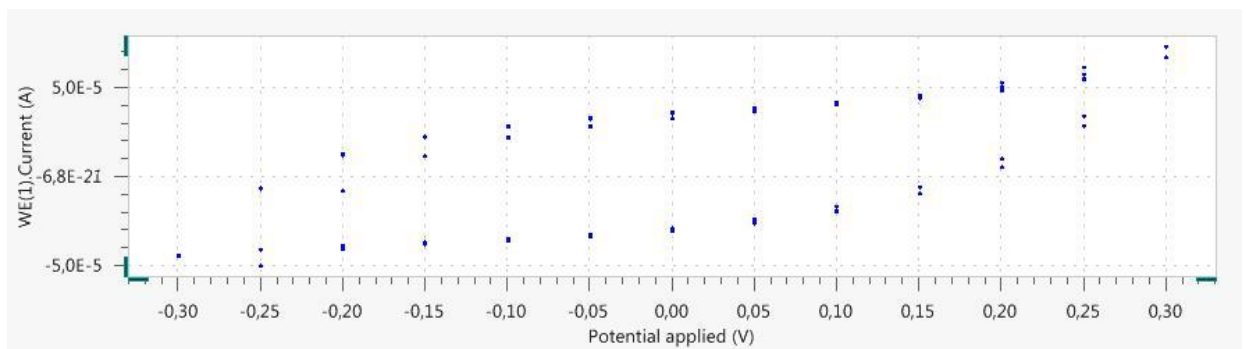


Рис. 2. Диаграмма зависимости тока от разности потенциалов в ФМТЭ, с использованием углеродных стержней в качестве материала электродов.

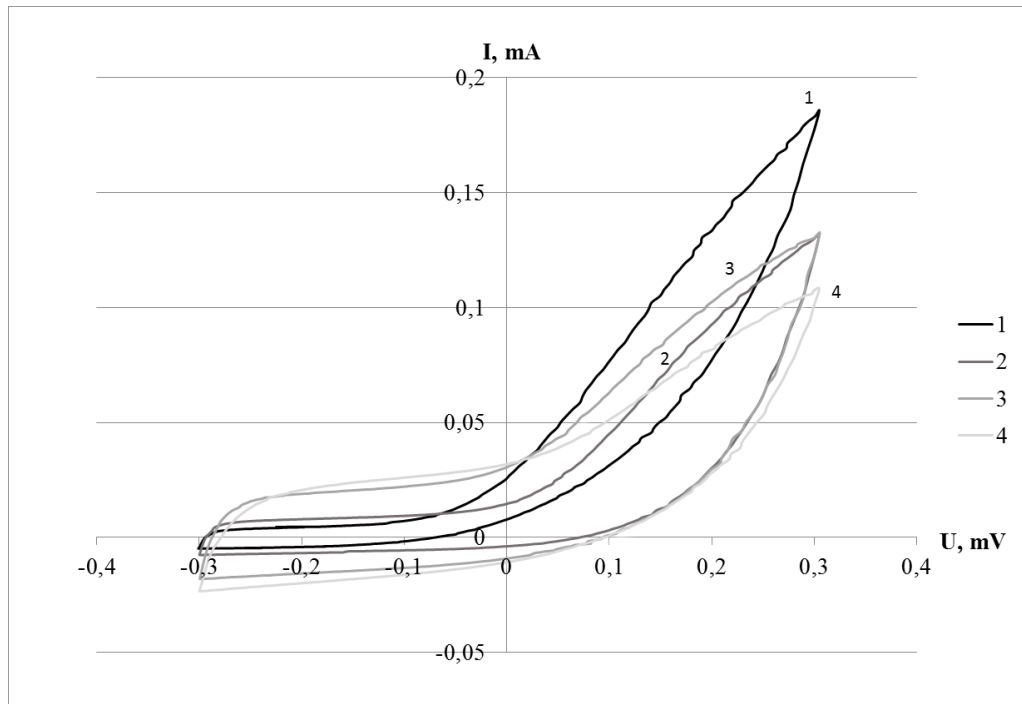
3.6 Углеродная ткань в работе по изучению процесса переноса заряда с биокатализатора на катод в ФМТЭ совмещенного с фотобиореактором

Углеродная ткань является широко распространенным и подходящим по электрохимическим свойствам материалом для электродов БТЭ. Данный материал биосовместим с живыми организмами, нетоксичен и устойчив к коррозии, что является полезными свойствами для применения для очистки сточных вод.

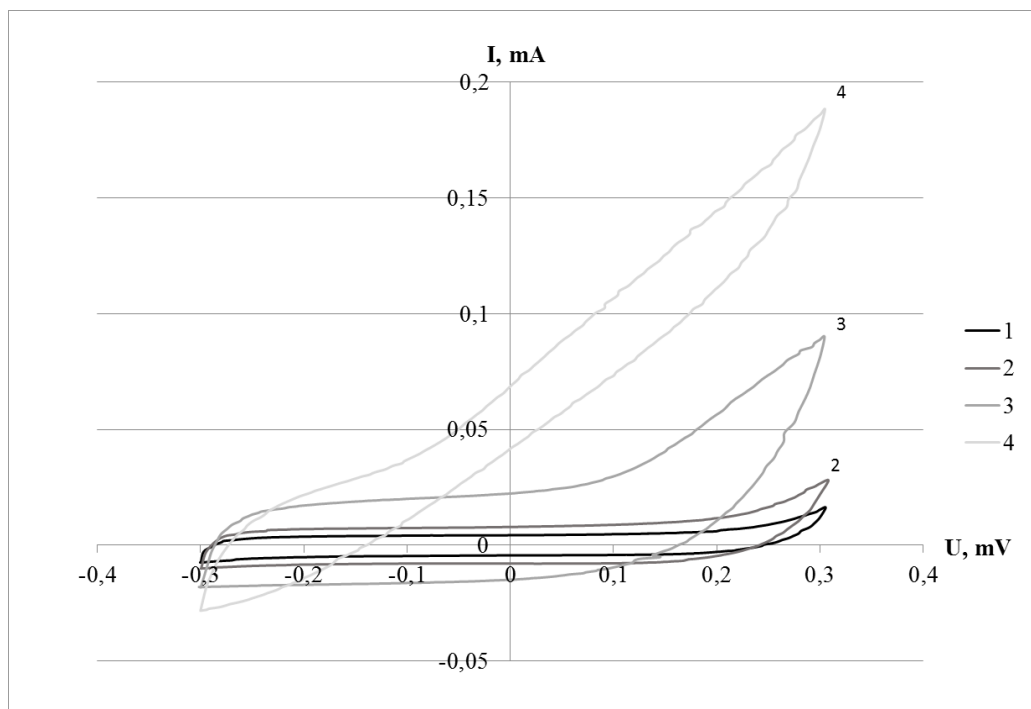
Исследовались образцы анодов с разным составом наносимой на них смеси. В первом случае – бактериальные клетки *Gluconobacter Oxydans*, PEDOT:PSS, PEGDE; во втором – *Gluconobacter Oxydans*, PEDOT:PSS. Эксперименты проводились с использованием синтетического аналога городских сточных вод. Никакого дополнительного химического медиатора не применялось.

Измерения вольтамперных характеристик проводились на потенциостате-гальваностате Autolab PGSTAT204 (Mertohm) (ПО NOVA 2.0). Все измерения проводились с заданным напряжением от –300 до +300 и обратно до –300 мВ (без прерывания) со скоростью разверстки потенциала 5 мВ/с.

Эксперименты проводились с несколькими повторностями. В результате изучения циклических вольтамперных характеристик работы ячейки ФМТЭ, совмещенным с лабораторным фотобиореактором, были достигнуты следующие максимальные удельные мощности: 4,752 мкВт/см² для первого образца анода в первый день экспериментов и 5,178 мкВт/см² для второго образца на четырнадцатый день эксперимента, хотя в первый день составила всего 0,094 мкВт/см² (рисунок 3 а, б).



(a)



(б)

Рис. 3. Диаграмма зависимости тока от напряжения в ФМТЭ анодов на основе углеродной ткани, где 1 – 1й день эксперимента, 2 – 6й день, 3 – 7й день, 4 – 14й день: (а) для первого образца анода и (б) для второго.

Повышение мощности для второго образца с течением времени исследования ФМТЭ может объясняться образованием биопленки на поверхности электрода.

Учитывая высокие показатели выходной мощности в ФМТЭ, совмещенным с фотобиореактором, можно сделать вывод, что такой вариант экономически доступного и экологически чистого ФБТЭ перспективен для исследований, направленных на поиск энергетически и экономически выгодного устройства для применения в муниципальных очистных сооружениях. Отсутствие медиатора, дешевизна электродных материалов и простота конструкции делают его перспективным для таких исследований. Тем не менее полученной выходной мощности недостаточно для применения его в качестве источника питания очистных сооружений. Дальнейшие исследования будут направлены на повышение эффективности работы ФМТЭ.

4. ВЫВОДЫ

1. Выбранные полимерные материалы, входящие в состав смеси, наносимой на электрод являются подходящими для высокоэффективной работы БТЭ. Было подтверждено, что проводящий органический полимер PEDOT:PSS повышает электропроводность биокатализатора на аноде. С помощью полимера PEDGE используемые биокатализаторы надежно закреплялись на поверхности материала анодов.

2. Показана возможность генерации электроэнергии в исследованиях с составом компонентов наносимой на анод из графитового стержня смеси (*Gluconobacter Oxydans*, PEDOT:PSS, PEGDE). Сравнивались соотношения количества компонентов 2:1:1 и 4:1:1. В первом случае максимальная удельная мощность составляла $0,052 \text{ мкВт/см}^2$, во втором – $0,251 \text{ мкВт/см}^2$.

3. Подтверждены более высокие значения генерируемого тока при использовании освещения фототрофных микроорганизмов *Euglena gracilis* в катодной камере фототрофного БТЭ, по сравнению с работой нефототрофного.

Значение максимального тока было выше примерно на 35% и составляло 9,5 мкА.

4. Выявлено, что безмембранные нефототрофные БТЭ демонстрируют стабильную работу и достигают мощности свыше $0,1 \text{ мкВт/см}^2$, что значительно удешевляет конструкцию и является заделом для применения таких БТЭ на практике.

5. Была показана возможность создания МТЭ на основе микроорганизмов *Gluconobacter Oxidans* с использованием углеродной ткани в качестве материала электрода. Максимальная удельная мощность таких устройств достигала порядка $9,532 \text{ мкВт/см}^2$.

6. С помощью исследований на сканирующем электронном микроскопе (SEM) установлено, что при добавлении бактерий *Gluconobacter Oxidans* в процессе приготовления геля позволяет биокатализатору закрепиться в самой структуре геля, а значит увеличивается удельная площадь поверхности электрода.

7. Был проведен сравнительный анализ данных полученных при изучении работы ФТЭ и МТЭ, использующих гель в качестве материала электродов, состава: PVA, CRG, PEDOT:PSS. Максимальная удельная мощность в ФТЭ существенно была выше и составляла $18,163 \text{ мкВт/см}^2$, в то время как в МТЭ $0,151 \text{ мкВт/см}^2$ (при концентрации глюкозы в субстрате 5%).

8. Проведена оценка мощностных характеристик ФМТЭ, совмещенного с лабораторным фотобиореактором для выращивания фототрофных микроводорослей *Chlorella Vulgaris*, максимальная удельная мощность составила $4,752 \text{ мкВт/см}^2$. При этом данные показатели были достигнуты при использовании среды, имитирующей сточные воды.

5. СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ ПО ТЕМЕ НАУЧНО-КВАЛИФИКАЦИОННОЙ РАБОТЫ (ДИССЕРТАЦИИ)

Статьи в рецензируемых журналах:

1. Gorin K.V., Badranova G.U., Gotovtsev P.M., Shatalova A.Y., Grigoriev T.E., Krasheninnikov S.V., Tihomirov S.A., Kondratev O.A., **Vishnevskaya M.V.**, Vasilov R.G. The CRG-PVA hydrogels study of properties with various nanoparticles and their application for cultivation of phototrophic microorganisms // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2018. T. 292, №1. 012051.

2. **Вишневская М.В.**, Газизова Д.А., Бадранова Г.У., Готовцев П.М., Василев Р.Г. Применение гелевых электродов для изучения БТЭ на основе фермента глюкозооксидаза // Вестник биотехнологии и физико-химической биологии имени Ю.А. Овчинникова, 2018. Т. 14, №3. С. 45-49.

3. **Vishnevskaya M.V.**, Gazizova D.A., Victorenko A.V., Konova I.A. Membraneless microbial biofuel cell for municipal waste water treatment // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2019. V. 337. 012002.

4. **Вишневская М.В.**, Готовцев П.М., Парунова Ю.М., Газизова Д.А., Василев Р.Г. Математическое моделирование работы ферментного биотопливного элемента в спинномозговой жидкости // Вестник биотехнологии и физико-химической биологии имени Ю.А. Овчинникова, 2019. Т. 15, №3. С. 19-24.

5. **Вишневская М.В.**, Парунова Ю.М., Готовцев П.М., Василев Р.Г. Применение биоанода на основе *Glucanobacter Oxydans* из углеродной ткани в фотобиореакторе для очистки сточных вод // Вестник биотехнологии и физико-химической биологии имени Ю.А. Овчинникова, 2019. Т. 15, №4. С. 17-21.

6. Плеханова Ю.В., Тарасов С.Е., Сомов А.С., Большин Д.С., **Вишневская В.М.**, Готовцев П.М., Решетилев А.Н. Микроразмерные источники энергии для имплантируемых и носимых медицинских устройств // Российские нанотехнологии, 2019. Т. 14, № 11-12. С. 3-14.

Опубликованные результаты интеллектуальной деятельности

1. Патент РФ на полезную модель "Анод для биотопливного элемента из карбонизованного волокнистого материала". Р. Г. Василев, **М. В. Вишневская**, Т. Е. Григорьев, А. Н. Решетилев, Т. Х. Тенчуринов, В. Г. Мамагулашвили, А. Д. Шепелев, С. Н. Чвалун. № 178485 от 05.04.2018 года, З.№ 2017146702 от

28.12.2017 года. Патентообладатель Федеральное государственное бюджетное учреждение "Национальный исследовательский центр "Курчатовский институт" (RU) — H01M8/16.

Тезисы докладов:

1. Газизова Д.А., **Вишневская М.В.** Применение гидрогелей на электродах для изучения ферментных биотопливных элементов на основе *Glucose Oxidase* // 61-я Всероссийская научная конференция МФТИ «Нано-, био-, информационные, когнитивные и социогуманитарные науки и технологии», Москва, Россия, 19–25 ноября 2018, С. 28.

2. Antipova K., Parunova Yu., **Vishnevskaya M.**, Grigor'ev T., Lukanina K., Krashennnikov S., Gazizova D., Gotovtsev P. Flexible electroconductive hydrogel for biosensors and biofuel cells application // IEEE 12th International Conference Developments in e-Systems Engineering – 2019, Kazan, Russia, 7–9 October 2019, P. 513-517.

3. Газизова Д.А., Готовцев П.М., **Вишневская М.В.** Применение электропроводящих гелей при изучении потенциально имплантируемых биотопливных элементов на основе фермента *Glucose Oxidase* // 62-я Всероссийская научная конференция МФТИ, Москва, Россия, 18–22 ноября 2019.

4. **Вишневская М.В.**, Викторенко А.В. Очистка сточных вод с помощью микробного топливного элемента на основе *Glucanobacter Oxydans* // 62-я Всероссийская научная конференция МФТИ, Москва, Россия, 18–22 ноября 2019.

5. **Вишневская М.В.**, Газизова Д.А., Готовцев П.М., Парунова Ю.М. Биотопливные элементы на основе фермента глюкозооксидаза с применением полимерных гидрогелей в качестве материала электродов // XVI Курчатовская междисциплинарная молодежная научная школа «НБИКС-природоподобные технологии», Москва, Россия, 2–5 декабря 2019, С. 82.

6. Романов А.О., Кирилова Д.А., Антипова К.Г., **Вишневская М.В.**, Азиева А.М., Готовцев П.М. Электропроводящий гидрогель на основе PEDOT:PSS // XVI

Курчатовская междисциплинарная молодежная научная школа «НБИКС-природоподобные технологии», Москва, Россия, 2–5 декабря 2019, С. 107.