



УДК 573.6

<https://doi.org/10.26516/2073-3372.2021.37.70>

## Новые и модифицированные конструкции биотопливных элементов

Г. О. Жданова

*Иркутский государственный университет, г. Иркутск, Россия*  
E-mail: [zhdanova86@ya.ru](mailto:zhdanova86@ya.ru)

**Аннотация.** Представлен обзор оригинальных новых и модифицированных конструкций биотопливных элементов (БТЭ): двухкамерных ячеек с протонообменной мембраной и однокамерных безмембранных. Разработанные модели позволяют изучать динамику рН, окислительно-восстановительных потенциалов, химического потребления кислорода модельной сточной воды, концентраций субстратов и прирост численности клеток микроорганизмов-электрогенов. Описана модификация БТЭ, позволяющая собирать водород, генерируемый на катодном электроде. Представлены конструктивные решения, удешевляющие, упрощающие и повышающие доступность технологии БТЭ. Показано, что в качестве биоагентов в описанных БТЭ хорошо работают общедоступные коммерческие микробиологические препараты для компостирования, выгребных ям и септиков, биоудобрения и индивидуальные штаммы микроорганизмов.

**Ключевые слова:** биотопливный элемент, генерирование электричества, биотехнология, двухкамерные БТЭ, безмембранные БТЭ.

**Для цитирования:** Жданова Г. О. Разработка и модификация конструкций биотопливных элементов // Известия Иркутского государственного университета. Серия Биология. Экология. 2021. Т. 37. С. 70–88. <https://doi.org/10.26516/2073-3372.2021.37.70>

### **Введение**

Текущий прогноз развития мировой энергетики демонстрирует необходимость поиска альтернативных ресурсов, поскольку в сложившейся ситуации невозобновляемые источники энергии истощаются очень быстрыми темпами. В связи с этим актуальность приобретает поиск способов высокоэффективного преобразования энергии и использования возобновляемых источников [Ali, Audi, Roussel, 2021]. Среди них одним из перспективных подходов является применение топливных элементов. Главные задачи изучения их эффективности – снижение стоимости и упрощение условий реализации технологии. В последние десятилетия исследователи пытаются найти решение этих вопросов с помощью биотехнологий.

Биоэлектрохимические системы (БЭС) представляют собой интересную и постоянно расширяющуюся область науки и техники; принципы их функционирования сочетают биологическую окислительно-восстановительную активность с классическими абиотическими электрохимическими реакциями [Bioelectrochemical systems ... , 2020]. На данный момент предложено несколь-

ко типов БЭС, которые, в частности, классифицированы по их применению. Первыми среди них были биотопливные элементы (БТЭ). Этот тип БЭС способен извлекать химическую энергию из сложных органических субстратов и преобразовывать её в полезную электроэнергию [Konwar, Mahanta, 2021]. БЭС, разработанные позднее, генерируют такие полезные продукты, как водород [A comprehensive review ..., 2016; Mateos, Martinez, Blanes, 2016], формиат [Formate production ..., 2021], ацетат [Long-term operation ..., 2013; Xafenias, Mapelli, 2014] и прочие [Glaven, 2019; Value added ... , 2021]. Некоторые БЭС опресняют воду [A review of ... , 2018; Performance of exoelectrogenic ... , 2020], применяются для биоремедиации загрязнителей [Current advances ... , 2018; Energy recover ... , 2018; The effect of ... , 2019].

Относительно теоретических и особенно практических аспектов использования БТЭ сегодня больше вопросов, чем ответов. Существуют многочисленные проблемы, не позволяющие успешно развернуть и внедрить технологию в реальные среды и производственные процессы. Обсуждаемая технология только начинает выходить за рамки лабораторных исследований. Вместе с тем это всё же не помешало ей превратиться в самостоятельную научную область. Последнему способствовало и то, что многие исследователи используют технологию БТЭ в качестве научного инструмента для понимания микробных [Paquete, 2020], биохимических [Rasmussen, Abdellaoui, Minteer, 2016], электрохимических [Redox electrochemistry to..., 2020] и поверхностных [Direct electrochemical interaction ..., 2005; Use of carbon mesh ... , 2009;] реакций в конкретных контролируемых условиях.

Разработки в данной области ведутся непрерывно. Ряд из них направлен на повышение эффективности БТЭ путём модификации электродов и поиска новых материалов для них [Applications of graphene..., 2017; A glassy carbon electrode ... , 2019; Recent progress of graphene ... , 2020]. Другая группа работ посвящена поиску и изучению новых более эффективных биоагентов [Application of eukaryotic ... , 2018; Electroactive microorganisms ... , 2019], подбору и оптимизации условий их функционирования в БТЭ [Suppressing methanogens ... , 2019], исследованию их взаимодействия с субстратами и электродами в БТЭ [Nearly monodisperse ..., 2016; Kittl, Ludwig, Corton, 2016]. Кроме того, актуальной остается разработка новых конструкций и модификаций БТЭ.

Ряд упомянутых выше аспектов разрабатывается в Иркутском государственном университете: здесь ведется поиск микроорганизмов-биодеструкторов, перспективных для генерирования электрической энергии в БТЭ, предложены некоторые электрогенные штаммы [The microorganisms used ... , 2018; The production of ... , 2018; Ацидофильные хемолитотрофные микроорганизмы ... , 2021; Acidophilic microorganisms ... , 2021; Bioelectrochemical processes ... , 2021], а также микробиологические консорциумы [Microbial mat ... , 2018; Микробиологический препарат ... , 2019; Comparative analysis ... , 2019; *Micrococcus luteus* and ... , 2020]. Имеются разработки, посвященные поиску путей интенсификации работы предложенных микроорганизмов в БТЭ [Intensifica-

tion of work ... , 2019; Zhdanova, Stom, Azarenko, 2019; Biocathode of ... , 2020].

Обобщённое описание вышеупомянутых новых конструкций и модификаций БТЭ и явилось целью данного обзора.

### **Результаты и обсуждение**

#### *1. Двухкамерные конструкции БТЭ*

Основным прототипом разработок БТЭ послужила сконструированная в 2012 г. в НИИ биологии ИГУ опытная конструкция № 1<sup>1</sup> (рис. 1). Этот БТЭ представляет собой конструкцию из оргстекла (Rohm Evonik GmbH, Германия), состоящую из двух камер объёмом 400 мл, размером 140×125×50 мм.



Рис. 1. Двухкамерный БТЭ из оргстекла (опытная конструкция № 1)

Камеры имеют отверстия для размещения в них электродов; при этом камеры идентичны, за исключением наличия в катодной дополнительного отверстия для аэрирования. Для разделения анодной и катодной камер использовали закреплённую между ними протонообменную мембрану МФ-4СК («Пластполимер», Россия). Электродами в данной конструкции служили карбид кремния («Подольскогнеупор», Россия) и углеродная ткань («СветлогорскХимволокно», Республика Беларусь).

Существующая конструкция была достаточно надежна, однако не позволяла получить доступ к содержимому камеры во время работы БТЭ без нарушения стерильности. Для решения этой задачи в нижней части анодной камеры разместили отверстие диаметром 25 мм, герметизируемое заглушкой из полипропиленовой резины (опытная конструкция № 2<sup>2</sup>) (рис. 2). В результате была получена возможность при помощи шприца неоднократно

<sup>1</sup> Микробный топливный элемент: пат. Рос. Федерации 151764. Лашин А. Ф., Стом Д. И., Протасов Е. С., Быбин В. А. № 2014125682/07; заявл. 24.06.2014; опубл. 20.04.2015. Бюл. № 11

<sup>2</sup> Биоэлектрохимический элемент: пат. Рос. Федерации 168093. Борохоев Н. Д., Жданова Г. О., Толстой В. М., Ржевичкий А. Э. № 2016127167; заявл. 05.07.2016; опубл. 18.01.2017. Бюл. № 2.

без нарушения анаэробных условий анодной камеры отбирать пробы для химического и биологического анализа, а также вносить необходимые компоненты в процессе работы БТЭ.

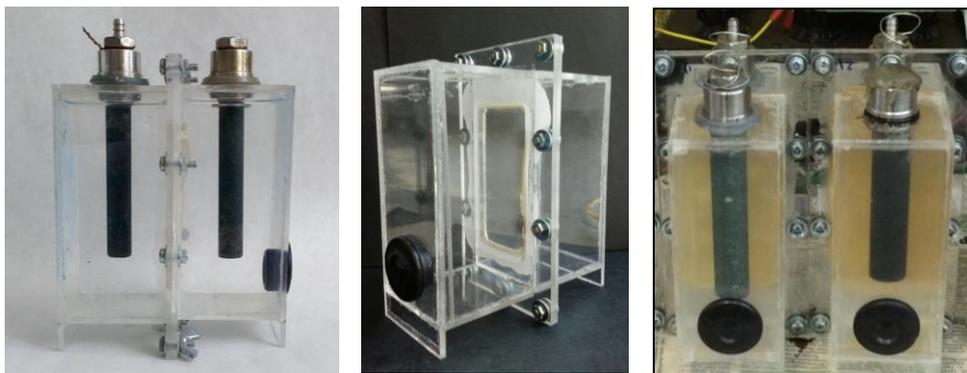


Рис. 2. Модернизированные БТЭ с заглушкой для инфузии (опытная конструкция № 2)

Для непрерывного мониторинга химических и микробиологических процессов, происходящих в анодном пространстве БТЭ, была создана новая модификация предложенного ранее элемента (опытная конструкция № 3). Предложенная конструкция отличается увеличенным объемом анодной камеры (135×148×60 мм, объем 500 мл) и наличием дополнительных отверстий для размещения Red-Ox- и рН-электродов. Кроме того, в боковой части камеры имеется закрытое плотно прилегающей резиновой заглушкой отверстие для отбора проб и внесения субстратов и биоагентов (рис. 3, А, Б). Полученная конструкция позволила изучить динамику рН, окислительно-восстановительного потенциала БТЭ, химического потребления кислорода (ХПК) модельной сточной воды, изменения концентраций субстратов и прирост численности клеток микроорганизмов-электрогенов.



Рис. 3. Модифицированный БТЭ, позволяющий измерять рН- и Ох-Red-потенциал анолита (опытная конструкция № 3). А – схема устройства БТЭ [Stom, Zhdanova, Kashaevskii, 2017]; Б – БТЭ в работе с подключенными измерительными электродами и рН-метром-иономером

Апробацию работы модифицированного БТЭ проводили, используя в качестве биоагента микробиологический препарат «Восток ЭМ-1» («Приморский ЭМ-Центр», Россия). Длительность экспонирования в серии экспериментов составляла 42 ч. Основной рабочей средой в БТЭ служила модельная сточная вода с добавлением пептона в качестве субстрата для микроорганизмов (состав (мг/л):  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  – 50;  $\text{KH}_2\text{PO}_4$  – 25;  $\text{CaCl}_2$  – 7,5;  $\text{MgSO}_4 \times 7\text{H}_2\text{O}$  – 5, пептон – 500<sup>3</sup>), обработанная в автоклаве непосредственно перед опытами. Полученные результаты представлены на рис. 4. Из них видно, что генерирование напряжения и силы тока препаратом «Восток ЭМ-1» в БТЭ сопровождается значительным снижением показателя ХПК модельной сточной воды (с 564,2 до 302,5 мгО<sub>2</sub>/л) (см. рис. 4, в). Последнее свидетельствует о снижении содержания субстрата под воздействием микроорганизмов.

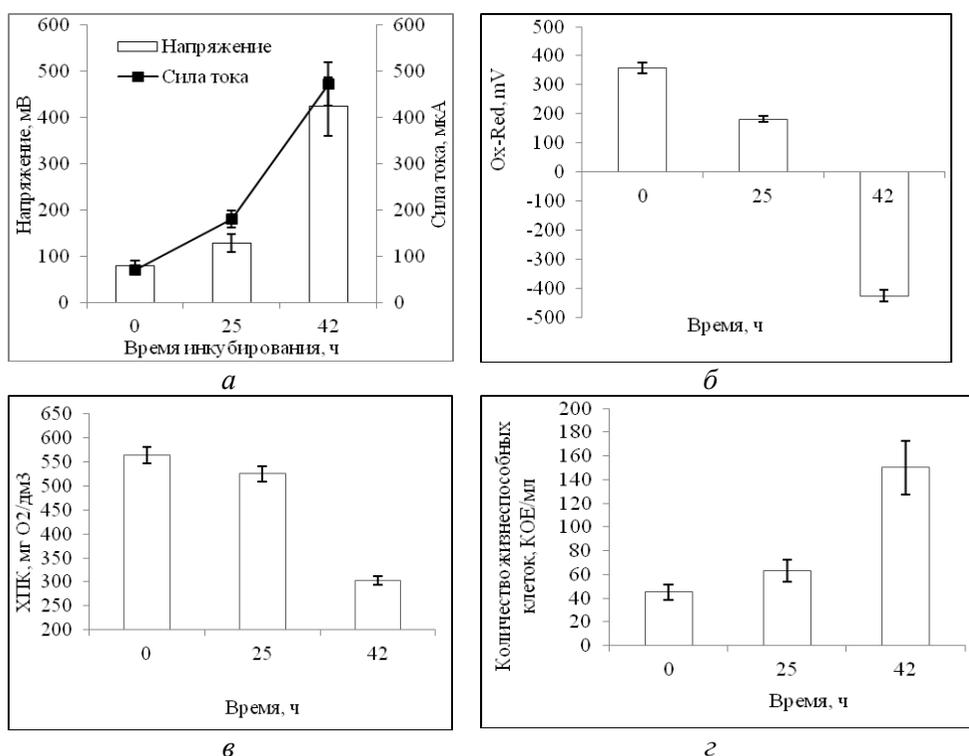


Рис. 4. Динамика различных показателей БТЭ (опытная конструкция № 3). а – напряжение разомкнутой цепи и сила тока короткого замыкания, б – окислительно-восстановительный потенциал содержимого анодного пространства, в – ХПК содержимого анодного пространства, г – количество жизнеспособных клеток препарата в анолите БТЭ (среда – модельная сточная вода, субстрат – пептон 0,5 г/дм<sup>3</sup>, биоагент – препарат «Восток ЭМ-1», электроды на основе карбида кремния)

<sup>3</sup> ГОСТ 32509-2013 Вещества поверхностно-активные. Метод определения биоразлагаемости в водной среде. М., 2014. 26 с.

Одновременно наблюдается падение Ох-Red-потенциала (от 358,5 до – 426,3 mV) (см. рис. 4, б). С другой стороны, фиксируется рост численности клеток микроорганизмов (с  $4,5 \pm 0,4 \cdot 10^2$  до  $1,5 \pm 0,6 \cdot 10^3$  КОЕ/мл) (см. рис. 4, з). При этом генерируемое в БТЭ напряжение возрастало в течение двухсуточного эксперимента до  $424,5 \pm 78$  мВ, сила тока короткого замыкания – до  $473 \pm 49$  мкА (см. рис. 4, а). Обратная динамика роста ЭДС, силы тока и численности клеток микроорганизмов по отношению к кривым снижения содержания субстрата и падения Ох-Red наблюдалась и при использовании других подобранных биоагентов.

С целью увеличения площади электродов и объёма электролита на основе опытной конструкции № 1 была предложена её укрупнённая модификация (опытная конструкция № 4) (рис. 5).

Принцип работы конструкции полностью идентичен механизму действия образца № 1, однако изменены геометрические размеры анодной и катодной камер ( $800 \times 120 \times 60$  мм) и, соответственно, их объём – по 1700 мл каждая.

Каждая камера имеет по одному герметично закупоривающемуся отверстию для электродов. В катодной камере имеется отверстие для подключения насоса для аэрации. Электроды длиной 710 мм и диаметром 32 мм представляют собой пористые карбидкремниевые трубки с интенсивной системой аэрации и существенно более высоким выходом электрической продукции.

Апробирование данной конструкции проводили при использовании биопрепарата «Доктор Робик 109» (ВИПЭКО, Россия) в качестве биоагента. В качестве электрода использовались углеродная ткань и карбид кремния.

Электрические показатели БТЭ с биопрепаратом «Доктор Робик 109» и углеродной тканью в качестве электрода интенсивно повышались в первые 72 ч инкубирования с дальнейшей стабилизацией. Напряжение разомкнутой цепи достигало 273 мВ, сила тока короткого замыкания возрастала до 1625 мкА (рис. 6, а, б). В аналогичном БТЭ с карбидкремниевым электродом максимальные значения исследуемых электрических параметров были выше, чем в БТЭ с углеродной тканью. Напряжение достигало 502 мВ, сила тока – 1987 мкА (рис. 7, а, б).



Рис. 5. Ячейка БТЭ (опытная конструкция № 4)

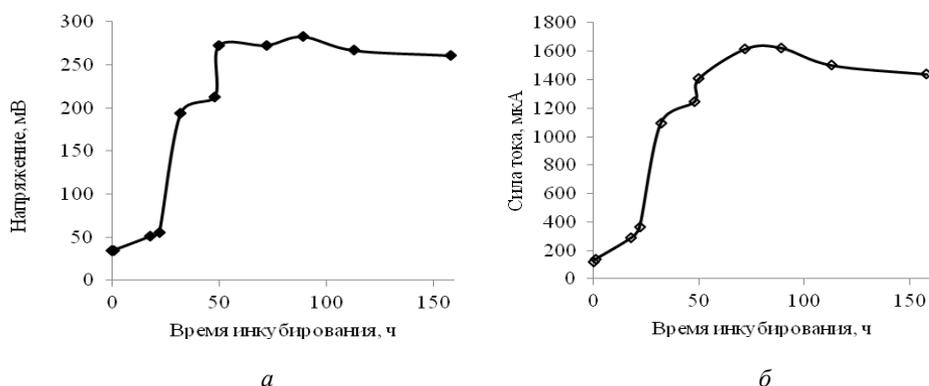


Рис. 6. Динамика напряжения (а) и силы тока (б), генерируемого коммерческим микробиологическим препаратом «Доктор Робик 109» в опытной конструкции БТЭ № 4 (среда – модельная сточная вода, субстрат – пептон 0,5 г/л, электроды – углеродная ткань)

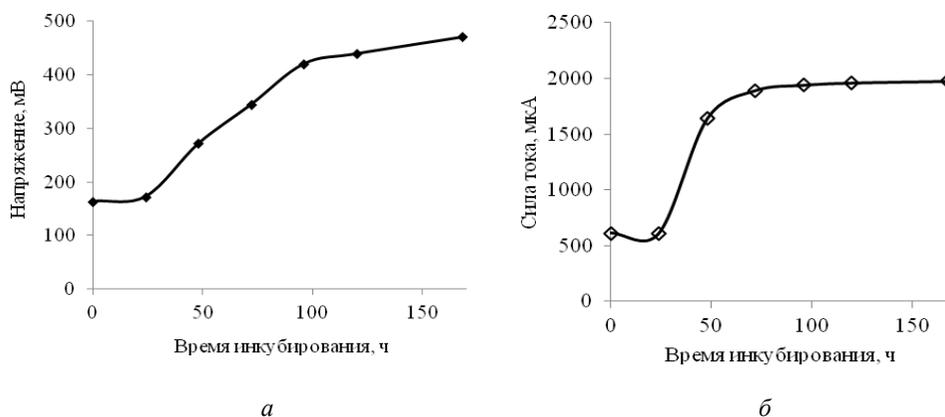


Рис. 7. Динамика напряжения (а) и силы тока (б), генерируемого коммерческим микробиологическим препаратом «Доктор Робик 109» в опытной конструкции БТЭ № 4 (среда – модельная сточная вода, субстрат – пептон 0,5 г/л, электроды – карбид кремния)

Для упрощения, удешевления и повышения доступности технологии БТЭ для изготовления ячеек предложена быстроразборная конструкция на основе стандартных элементов, легкодоступных и широко используемых в водопроводных и канализационных системах, формирующих объём электродных камер. Ячейка имеет размеры 140×127×55 мм и диаметр камеры 38 мм, объём камеры составляет 130 мл. В крышке анодной камеры имеются два отверстия, через одно из которых вводится электрод, второе служит для заправки и введения в БТЭ препаратов и герметично закрывается болтом с резиновой прокладкой; в крышке катодной камеры имеются четыре отверстия: для электрода, для заправки и два для аэрации. Электроды для ячеек изготовлены в виде медных полых цилиндров разного диаметра, размещённых один внутри другого и соединённых медными перегородками; сверху

электрод покрыт токопроводящей графитовой краской для снижения риска закисления анолита производными меди. В качестве протоннообменной мембраны использовали мембрану СМІ-7000 (Membranes International, США) (рис. 8).



Рис. 8. Двухкамерный БТЭ из ПВХ-деталей сантехнического назначения (опытная конструкция № 5) в собранном (А) и разобранном (Б) виде

В качестве биоагентов при апробировании предложенной конструкции в БТЭ также использовали коммерческие комплексные микробные препараты: «Доктор Робик 109К» и препарат эффективных микроорганизмов (ЭМ) «Тамир» («ЭМ-Центр», Россия). При экспонировании в течение 6 сут. наблюдали последовательное возрастание выходных характеристик БТЭ, что свидетельствовало о работоспособности конструкции: биопрепарат генерировал напряжение до 274 мВ и силу тока до 433 мкА. При использовании биопрепарата «Доктор Робик 109» зарегистрирована несколько меньшая эффективность: напряжение возросло до 262 мВ, сила тока – до 63 мкА (рис. 9, а, б).

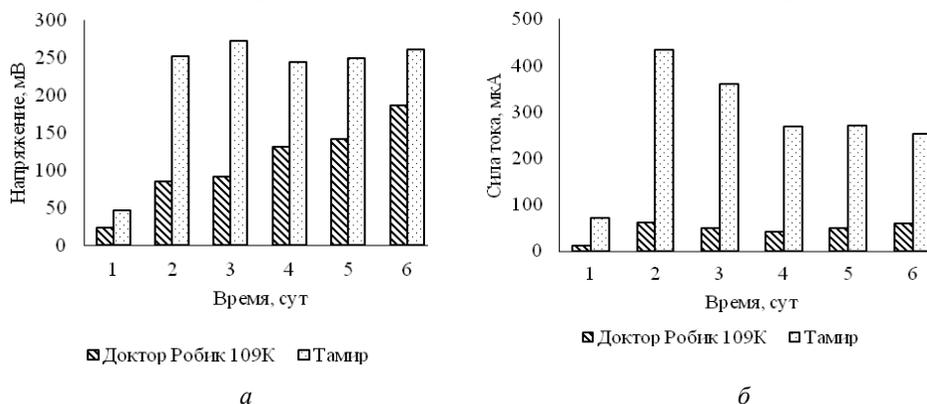


Рис. 9. Динамика напряжения (а) и силы тока (б), генерируемого коммерческими микробиологическими препаратами «Доктор Робик 109» и «Тамир» в опытной конструкции БТЭ № 5 (среда – модельная сточная вода, субстрат – пептон 0,5 г/л, электроды – металлические с графитовым напылением)

При изучении процессов генерирования водорода в БТЭ важной задачей являлось отведение образовавшегося в камере газа с наименьшими его потерями. Стандартным подходом является отведение газа по трубкам через водяной затвор. Однако при таком способе возможны значительные потери газа. Поэтому для сбора  $H_2$  из БТЭ было предложено использовать водно-масляный затвор, располагающийся в непосредственной близости от камеры, в которой идёт газообразование (рис. 10, А).

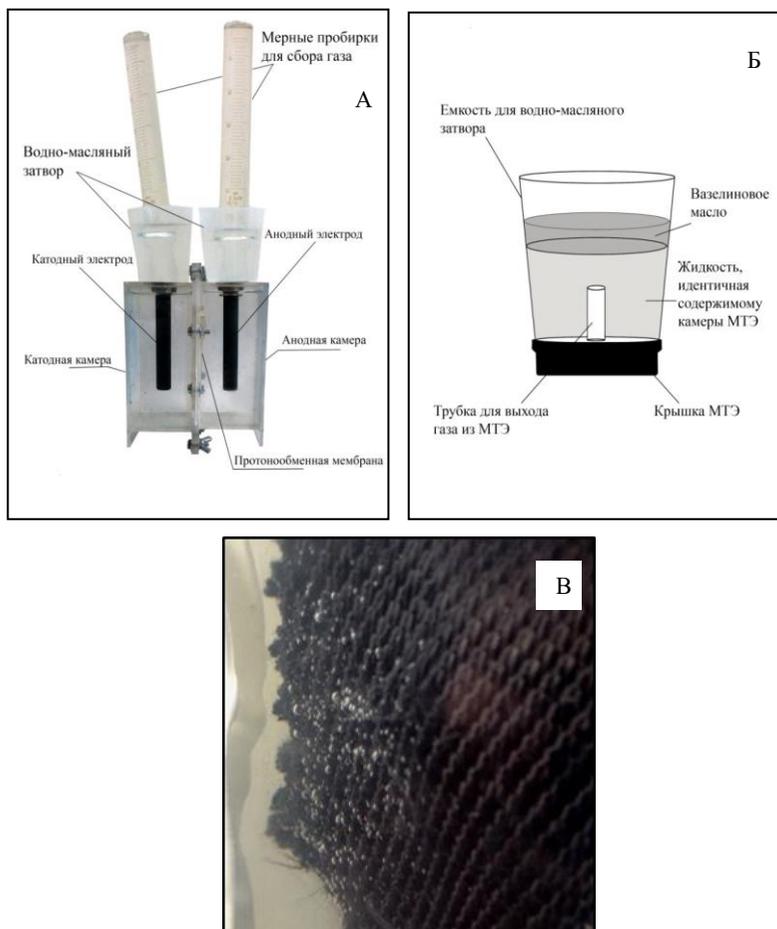


Рис. 10. Модификация БТЭ с водно-масляным затвором и трубкой для отвода водорода (опытная конструкция № 7). А – собранная конструкция; Б – схема газосборника; В – пузырьки газа на углеродной ткани в катодной камере БТЭ

На крышки, закупоривающие камеры БТЭ и фиксирующие верхнюю часть из углеродной ткани электрода, были присоединены ёмкости, заполняемые жидкостью, аналогичной по составу содержимому БТЭ. В нижней части ёмкостей располагалась пластиковая трубка, выходящая из камеры БТЭ, на которую помещали мерные пробирки-газосборники, заполненные дистиллированной водой. Жидкость в ёмкости покрывали слоем вазелино-

вого масла для сохранения анаэробных условий в камере (рис. 10, Б). Апробирование конструкции доказало приемлемость её использования для фиксации водорода, образуемого на катодном электроде БТЭ. Так, при подаче на катод напряжения величиной  $-300$  мВ в течение 7 сут. (168 ч) в катодной камере БТЭ выделилось 10 мл газовой смеси, содержащей 50,6 % водорода. Таким образом, количество выделившегося газообразного водорода в данном эксперименте составило 0,375 мг. При этом газ начинал выделяться на катодном электроде БТЭ уже на вторые сутки эксперимента (рис. 10, В).

## 2. Однокамерные конструкции БТЭ

Несмотря на доступность деталей опытной конструкции № 5 и простоту их сборки, стоимость готовой конструкции двухкамерного БТЭ по-прежнему достаточно высока, поскольку основная часть стоимости изготовления ячеек БТЭ приходится на протонообменную мембрану. Это обстоятельство является основной причиной ограничения выхода технологии БТЭ за рамки лабораторных исследований. Для дальнейшего удешевления технологии и упрощения сборки БТЭ были предложены однокамерные безмембранные БТЭ (опытная конструкция № 6) (рис. 11, А). Сборку разработанных однокамерных БТЭ также производили из деталей сантехнического назначения (сборочные элементы сетей внутренней канализации – Т-образные тройники из полипропилена размерами  $40 \times 40 \times 87^\circ$  и заглушки к ним (Sinikon, Россия)). Целиком заполненная внутренняя полость являлась анодной областью, в которой размещали электрод из углеродной ткани. Катодный электрод (также из углеродной ткани) располагался на границе анолита с воздухом, при этом преградой между катодом и содержимым анодного пространства выступал слой агара толщиной 10–12 мм (рис. 11, Б).

Верхней и нижней частями камеры БТЭ служили входы тройника (рис. 11, В). Диаметр входных отверстий составлял 40 мм. К нижней части тройника с помощью цианакрилатного клея прикрепляли соответствующую по размеру канализационную заглушку (рис. 11, Г). Место склейки после высыхания дополнительно герметизировали. Объем получившейся камеры составил 400 мл. Аналогичная заглушка для внутренней канализации служила крышкой для верхней части камер. Через одно отверстие в заглушке диаметром 2 мм пропускали медный провод длиной 11 см, через другое отверстие диаметром 5 мм – силиконовую трубку с водным затвором, отводящую газы, образуемые в процессах жизнедеятельности микроорганизмов (рис. 11, Д). Для поддержания анаэробных условий внутри камеры щели между крышкой и камерой обрабатывали герметиком (рис. 11, Е).

Апробирование разработанной конструкции (рис. 11, Ж) показало, что БТЭ на основе коммерческих микробиологических препаратов «ВОН!» (ИП Дугарова, Россия), «Доктор Робик 109», «Байкал-ЭМ1» («ЭМ-Кооперация», Россия), «ЭМ-Био» генерировали в течение 96 ч эксперимента напряжение 357–546 мВ (рис. 12, А) и силу тока 597–843 мкА (рис. 12, Б).

Зафиксированный прирост электрических показателей в ходе эксплуатации предложенной безмембранной конструкции демонстрирует ее работоспособность.



Рис. 11. Однокамерный БТЭ (опытная конструкция № 6). А – однокамерный БТЭ в собранном виде; Б – схема устройства катода; В – Т-образный тройник для внутренней канализации из полипропилена, служащий рабочей камерой БТЭ; Г – заглушка для верхней части БТЭ. Крышка рабочей камеры однокамерного БТЭ с трубкой для отвода газов и медным проводом 20 AWG OD (1,8 мм) для прикрепления анодного электрода: Д – вид изнутри; Е – вид снаружи; Ж – установка в работе [Zhdanova, Dukhnov, Stom, 2018]

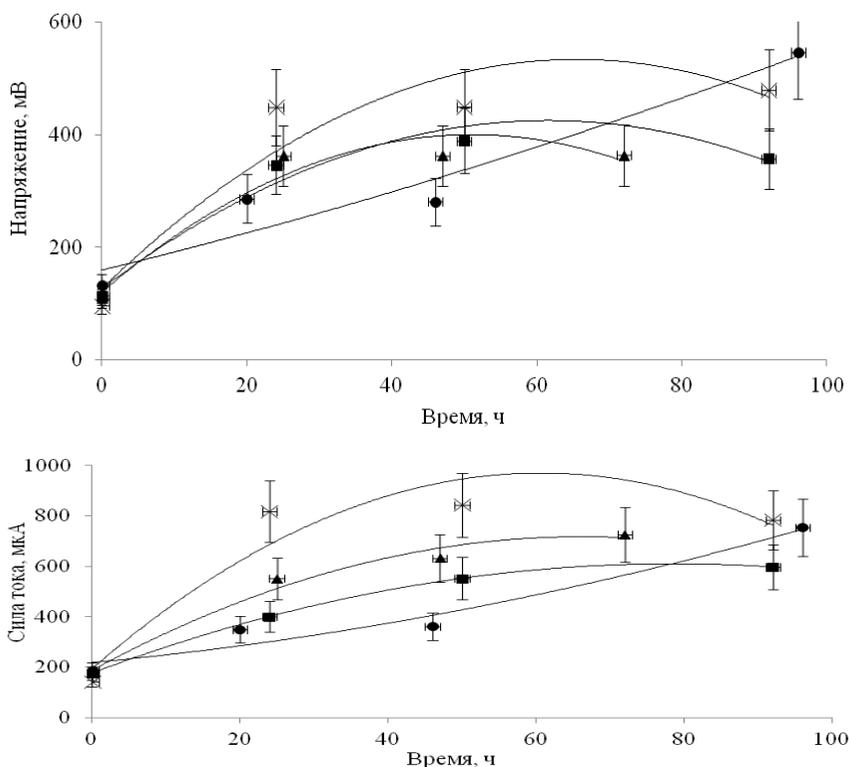


Рис. 12. Динамика напряжения (А) и силы тока (Б), генерируемого коммерческими микробиологическими препаратами в однокамерном БТЭ (среда – модельная сточная вода, субстрат – пептон 0,15 г/л, электроды – углеродная ткань). Биоагенты: ● – «ВОИ!»; × – «Доктор Робик 109»; ▲ – «Байкал-ЭМ1»; ■ – «ЭМ-Био»

### Заключение

Предложенные и апробированные новые и модифицированные макеты БТЭ двухкамерного типа (с протонообменной мембраной) позволяют решать различные исследовательские задачи: 1) осуществлять непрерывный мониторинг химических и микробиологических процессов, происходящих в анодном пространстве (изучить динамику рН, окислительно-восстановительных потенциалов, ХПК модельной сточной воды, изменения концентраций субстратов и прирост численности клеток микроорганизмов-электрогенов); 2) неоднократно, без нарушения стерильности и анаэробных условий в анодной камере БТЭ, отбирать пробы для химического и биологического анализа, а также вносить необходимые компоненты, не прерывая процесса работы БТЭ; 3) осуществлять сбор  $H_2$ , генерируемого на катодном электроде. Стоимость технологии снижена, поскольку однокамерные конструкции БТЭ собраны из недорогих распространённых деталей сантехнического назначения без протонообменной мембраны, которая является наиболее дорогим компонентом классических БТЭ.

Апробирование разработанных конструкций показало, что в качестве биоагентов в описанных БТЭ хорошо себя зарекомендовали общедоступные коммерческие микробиологические препараты для компостирования, выгребных ям и септиков, биоудобрения и индивидуальные штаммы микроорганизмов.

*Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ и Министерства культуры, образования, науки и спорта Монголии в рамках научного проекта № 19-58-44003.*

#### Список литературы

Ацидофильные хемолитотрофные микроорганизмы: перспективы применения в биогидрометаллургии и в микробных топливных элементах / О. Б. Калашникова, А. В. Кашевский, Н. С. Варданын, Д. Эрдэнэчимэг, Г. О. Жданова, И. А. Топчий, О. Н. Понаморёва, О. Ф. Вятчина, Д. И. Стом // Известия вузов. Прикладная химия и биотехнология. 2021. Т. 11. N 1. С. 34–52. <https://doi.org/10.21285/2227-2925-2021-11-1-34-52>

Микробиологический препарат «Доктор Робик 109» как биоагент для получения электрического тока в МТЭ при добавлении жиров / О. С. Коркина, Г. И. Сарапулова, Г. О. Жданова, Ю. О. Горбунова, Е. А. Иванчиков, Д. И. Стом, В. Н. Бешков // Известия Иркутского государственного университета. Серия Биология. Экология. 2019. Т. 28. С. 17–25. <https://doi.org/10.26516/2073-3372.2019.28.17>

A comprehensive review of microbial electrolysis cells (MEC) reactor designs and configurations for sustainable hydrogen gas production / K. Y. Simayi, P. Abdesahian, N. F. Azman, K. Chandrasekhar, M. S. Kalil // Alex. Eng. J. 2016. Vol. 55. P. 427–443. <https://doi.org/10.1016/j.aej.2015.10.008>

A glassy carbon electrode modified with reduced graphene oxide and gold nanoparticles for electrochemical aptasensing of lipopolysaccharides from *Escherichia coli* bacteria / M. Pourmadadi, J. S. Shayeh, M. Omid, F. Yazdian, M. Alebouyeh, L. Tayebi // Microchim. Acta. 2019. Vol. 186. P. 787. <https://doi.org/10.1007/s00604-019-3957-9>

A review of microbial desalination cell technology: Configurations, optimization and applications / A. Al-Mamun, W. Ahmad, M. S. Baawain, M. Khadem, B. R. Dhar // J. Clean. Prod. 2018. Vol. 183. P. 458–480. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.02.054>

Acidophilic microorganisms *Leptospirillum* sp., *Acidithiobacillus* sp., *Ferroplasma* sp. as a cathodic bioagents in a MFC / D. I. Stom, G. O. Zhdanova, O. B. Kalashnikova, A. G. Bulaev, A. V. Kashevskii, A. B. Kupchinsky, N. S. Vardanyan, O. N. Ponomoreva, S. V. Alferov, M. N. Saksonov, A. N. Chesnokova, M. Yu. Tolstoy // Geomicrobiol. J. 2021. Vol. 38. N 4. P. 340–346. <https://doi.org/10.1080/01490451.2020.1856980>

Ali A., Audi M., Roussel Y. Natural Resources Depletion, Renewable Energy Consumption and Environmental Degradation: A Comparative Analysis of Developed and Developing // Int. J. Energy Econ. 2021. Vol. 11. N 3, P. 251–260. <https://doi.org/10.32479/ijee.11008>

Application of eukaryotic and prokaryotic laccases in biosensor and biofuel cells: recent advances and electrochemical aspects / Y. Zhang, Z. Lv, J. Zhou, F. Xin, J. Ma, H. Wu, Y. Fang, M. Jiang, W. Dong // Appl. Microbiol. Biotechnol. 2018. Vol. 102. P. 10409–10423. <https://doi.org/10.1007/s00253-018-9421-7>

Applications of Graphene in Microbial Fuel Cells: The Gap between Promise and Reality / E. Mekawy, H. M. Hegab, D. Losic, C. P. Saint, D. Pant // Renew. Sust. Energ. Rev. 2017. Vol. 72. P. 1389–1403. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.10.044>

Biocathode of microbial fuel cells based on nitrate-reducing strains of *Pseudomonas aeruginosa* / O. F. Vyatchina, D. I. Stom, S. Goel, B. Xie // IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci. 2020. Vol. 408. 012084. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/408/1/012084>

Bioelectrochemical processes of oxidation of dicarboxylic amino acids by strain *Micrococcus luteus* 1-I in a biofuel cell / A. V. Kuznetsov, N. N. Khorina, E. Yu. Konovalova, D. Yu. Amsheev, O. N. Ponamoreva, D. I. Stom // IOP Conf. Ser. : Earth Environ. Sci. 2021. Vol. 808. 012038. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/808/1/012038>

Bioelectrochemical systems for a circular bioeconomy / S. Jung, J. Lee, Y.-K. Park, E. E. Kwon // Bioresour. Technol. 2020. Vol. 300. 122748. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2020.122748>

Comparative analysis of electrogenic activity of complex microbial preparations in microbial fuel cells / G. O. Zhdanova, E. Yu. Konovalova, M. Yu. Tolstoy, A. V. Kashevsky, L. Barbora, P. Goswami, S. Goel, V. A. Fialkow, A. B. Kupchinsky, D. I. Stom // IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci. 2019. Vol. 272. 032161 <https://doi.org/10.1088/1755-1315/272/3/032161>

Current advances of VOCs degradation by bioelectrochemical systems: A review / S. Zhang, J. You, C. Kennes, Z. Cheng, J. Ye, D. Chen, J. Chen, L. Wang // Chem. Engin. J. 2018. Vol. 334. P. 2625–2637. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2017.11.014>

Direct Electrochemical Interaction between a Modified Gold Electrode and a Bacterial Membrane Extract / L. J. C. Jeuken, S. D. Connell, M. Nurnabi, J. O'Reilly, P. J. F. Henderson, S. D. Evans, R. J. Bushby // Langmuir. 2005. Vol. 21. P. 1481–1488. <https://doi.org/10.1021/la047732f>

Electroactive microorganisms in bioelectrochemical systems / B. E. Logan, R. Rossi, A. Ragab, P. E. Saikaly // Nat. Rev. Microbiol. 2019. Vol. 17. P. 307–319. <https://doi.org/10.1038/s41579-019-0173-x>

Energy Recovery with Microbial Fuel Cells: Bioremediation and Bioelectricity / D. Bose, V. Kandpal, H. Dhawan, P. Vijay, M. Gopinath // Waste Bioremediation. Energy, Environment, and Sustainability / S. Varjani, E. Gnansounou, B. Gurunathan, D. Pant, Z. Zakaria (eds). Springer, Singapore. 2018. pp 7–33. [https://doi.org/10.1007/978-981-10-7413-4\\_2](https://doi.org/10.1007/978-981-10-7413-4_2)

Formate production from CO<sub>2</sub> electroreduction in a salinity-gradient energy intensified microbial electrochemical system / Y. Tian, D. Li, G. Liu, C. Li, J. Liu, J. Wu, J. Liu, Y. Feng // Bioresour. Technol. 2021. Vol. 320. Part A. 124292. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2020.124292>

Glaven S. M. Bioelectrochemical systems and synthetic biology: more power, more products // Microb. Biotechnol. 2019. Vol. 12(5). P. 819–823. <https://doi.org/10.1111/1751-7915.13456>

Intensification of work of biofuel elements of heterogeneous metal complex catalysts "Catan" / D. A. Kochetkova, A. K. Onishchenko, O. B. Kalashnikova, G. O. Zhdanova, D. I. Stom // 19th Int. Sci. Geoconf. SGEM 2019. 2019. Vol. 19, Is. 4.1. P. 263–270

Kittel S. R., Ludwig R., Gorton L. Direct Electron Transfer from the FAD Cofactor of Cellobiose Dehydrogenase to Electrodes // ACS Catalysis. 2016. Vol. 6. P. 555–563. <https://doi.org/10.1021/acscatal.5b01854>

Konwar G. B. E., Mahanta D. Flexible Biofuel Cells: An Overview // Biofuel Cells / Inamuddin, M. I. Ahamed, R. Boddula, M. Rezakazemi (eds). 2021. <https://doi.org/10.1002/9781119725008.ch6>

Long-term Operation of Microbial Electrosynthesis Systems Improves Acetate Production by Autotrophic Microbiomes / C. W. Marshall, D. E. Ross, E. B. Fichot, R. S. Norman, H. D. May // Environ. Sci. Technol. 2013. Vol. 47. P. 6023–6029. <https://doi.org/10.1021/es400341b>

Mateos E. R., Martínez E. J., Blanes J. Microbial electrolysis cells: An emerging technology for wastewater treatment and energy recovery. From laboratory to pilot plant and beyond // Renew. Sustain. Energy Rev. 2016. Vol. 55. 942e956. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.11.029>

Microbial mat of the thermal springs Kuchiger Republic of Buryatia: species composition, biochemical properties and electrogenic activity in biofuel cell / D. A. Yuriev, S. V. Zaitseva, G. O. Zhdanova, M. Yu. Tolstoy, D. D. Barkhutova, O. F. Vyatchina, E. Yu. Konovalova, D. I. Stom // IOP Conf. Ser. : Earth Environ. Sci. 2018. Vol. 121. 022012. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/121/2/022012>

*Micrococcus luteus* and *Serratia marcescens*, as a new association of bioagents for microbial fuel cells / E. Yu. Konovalova, L. Barbora, K. I. Chizhik, D. I. Stom // IOP Conf. Ser. : Earth Environ. Sci. 2020. Vol. 408. Sustainable and Efficient Use of Energy, Water and Natural Resources: 2nd Int. Sci. Conf. 012080. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/408/1/012080>

Nearly Monodisperse Carbon Nanotube Furnished Nanocatalysts as Highly Efficient and Reusable Catalyst for Dehydrocoupling of DMAB and C1 to C3 Alcohol Oxidation / Ç. S. Kuzu, E. Erken, H. Sert, Y. Koşkun, F. Şen // Int. J. Hydrog. Energy. 2016. Vol. 41. P. 3093–3101. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2015.12.138>

Paquete C. M. Electroactivity across the cell wall of Gram-positive bacteria // Comput. Struct. Biotechnol. J. 2020. Vol. 18. P. 3796–3802. <https://doi.org/10.1016/j.csbj.2020.11.021>

Performance of Exoelectrogenic Bacteria Used in Microbial Desalination Cell Technology / L. Guang, D. A. Koomson, H. Jingyu, D. Ewusi-Mensah, N. Miwornunyuie // Int. J. Environ. Res. Public Health. 2020. Vol. 17(3). P. 1121. <https://doi.org/10.3390/ijerph17031121>

Rasmussen M., Abdellaoui S., Minter S. D. Enzymatic Biofuel Cells: 30 Years of Critical Advancements // Biosens. Bioelectron. 2016. Vol. 76. P. 91–102. <https://doi.org/10.1016/j.bios.2015.06.029>

Recent progress of graphene based nanomaterials in bioelectrochemical systems / A. G. Olabi, T. Wilberforce, E. T. Sayed, K. Elsaid, H. Rezk, M. A. Abdelkareem // Sci. Total Environ. 2020. Vol. 749. 141225. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.141225>

Redox Electrochemistry to Interrogate and Control Biomolecular Communication / E. V. Arsdale, J. Pitzer, G. F. Payne, W. E. Bentley // iScience. 2020. Vol. 23(9). 101545. <https://doi.org/10.1016/j.isci.2020.101545>

Stom D. I., Zhdanova G. O., Kashevskii A. V. New designs of biofuel cells and testing of their work // IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng. 2017. Vol. 262. Int. Conf. on Construction, Architecture and Technosphere Safety. 012219. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/262/1/012219>

Suppressing methanogens and enriching electrogens in bioelectrochemical systems / D. A. Jadhav, A. D. Chendake, A. Schievano, D. Pant // Bioresour. Technol. 2019. Vol. 277. P. 148–156. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2018.12.098>

The effect of bioelectrochemical systems on antibiotics removal and antibiotic resistance genes: A review / W. Yan, Y. Xiao, W. Yan, R. Ding, S. Wang, F. Zhao // Chem. Eng. J. 2019. Vol. 358. P. 1421–1437. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2018.10.128>

The Microorganisms Used for Working In Microbial Fuel Cells / E. Yu. Konovalova, D. I. Stom, G. O. Zhdanova, D. A. Yuriev, Y. Li, L. Barbora, P. Goswami // AIP Conf. Proc. 2018. Vol. 1952. 020017. <https://doi.org/10.1063/1.5031979>

The production of biofuel and the generation of electricity by *Clostridium acetobutylicum* in microbial fuel cells / Yu. O. Gorbunova, L. S. Karpukhina, M. Yu. Tolstoy, S. S. Timofeeva, D. I. Stom // 18th Int. Sci. Geoconf SGEM 2018 (Albena, Bulgaria). 2018. Vol. 18 Energy and Clean Technologies, Is. 4.1. P. 705–712.

Use of Carbon Mesh Anodes and the Effect of Different Pretreatment Methods on Power Production in Microbial Fuel Cells / X. Wang, S. Cheng, Y. Feng, M. D. Merrill, T. Saito, B. E. Logan // Environ. Sci. Technol. 2009. Vol. 43. P. 6870–6874. <https://doi.org/10.1021/es900997w>

Value added products from wastewater using bioelectrochemical systems: Current trends and perspectives / T. Wilberforce, E. T. Sayed, M. A. Abdelkareem, K. Elsaid, A. G. Olab // J. Water Process Eng. 2021. Vol. 39. 101737. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2020.101737>

Xafenias N., Mapelli V. Performance and bacterial enrichment of bioelectrochemical systems during methane and acetate production // Int. J. Hydrogen Energy. 2014. Vol. 39. P. 21864–21875. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2014.05.038>

Zhdanova G. O., Dukhnov S. S., Stom D. I. Single-cell biofuel element of simple construction from sanitary parts and testing of its work // IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng. 2018. Vol. 451. Int. Conf. on Construction, Architecture and Technosphere Safety. 012230. URL: <http://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/451/1/012230>

Zhdanova G. O., Stom D. I., Azarenko E. V. Elimination of nitrate ions in bio-fuel cells // IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci. 2019. Vol. 229. Prospects Mining and Metallurgy Industry Development. 012031. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/229/1/012031>

## New and Modified Biofuel Cell Designs

G. O. Zhdanova

*Irkutsk State University, Irkutsk, Russian Federation*

**Abstract.** A description of new and modified layouts of biofuel cells (BFC) is given: two-chamber cells with a proton-exchange membrane and single-chamber membraneless structures. BFCs have been proposed that allow repeatedly, without violating sterility and anaerobic conditions in the anode chamber, to take samples for chemical and biological analysis. They are also suitable for adding the necessary components without interrupting the BFC operation. For continuous monitoring of chemical and microbiological processes occurring in the anode space, a modification of the BFC has been proposed, which has an increased volume of the anode chamber and additional holes for placing Red-Ox and pH electrodes. The resulting constructs made it possible to study the dynamics of pH, redox potentials, COD of model wastewater, substrate concentrations, and an increase in the number of cells of electrogenic microorganisms. Another variant of the BFC layout makes it possible to collect H<sub>2</sub> generated at the cathode electrode. For this, it is proposed to use a water-oil seal. It is located in the immediate vicinity of the chamber in which gassing is taking place – on the lid that clogs the BFC chamber. To simplify, reduce the cost and increase the availability of BFC technology for the manufacture of cells, a quickly collapsible two-chamber design is proposed. It is assembled from standard elements readily available and widely used in plumbing and sewerage systems. The proton exchange membrane is the most expensive component of classical BFCs. Therefore, the design of a single-chamber BFC from inexpensive parts for sanitary purposes without a proton-exchange membrane has been proposed and tested. This significantly reduces the cost of technology. It has been shown that generally available commercial microbiological preparations for composting, cesspools and septic tanks, biofertilizers and individual strains of microorganisms work well as bioagents in the described BFCs.

**Keywords:** biofuel cell, electricity generation, biotechnology, two-chamber BFC, membraneless BFC.

**For citation:** Zhdanova G.O. Development and modification of biofuel cell designs. *The Bulletin of Irkutsk State University. Series Biology. Ecology*, 2021, vol. 37, pp. 70-88. <https://doi.org/10.26516/2073-3372.2021.37.70> (in Russian)

### References

Kalashnikova O.B., Kashevskii A.V., Vardanyan N.S., Erdenechimeg D., Zhdanova G.O., Topchiy I.A., Ponamoreva O.N., Vyatchina O.F., Stom D.I. Atsidofil'nye khemolitotrofnye mikroorganizmy: perspektivy primeneniya v biogidrometallurgii i v mikrobnnykh toplivnykh elementakh [Acidophilic chemolithotrophic microorganisms: prospects for use in bihydrometallurgy and microbial fuel cells]. *Izvestiya Vuzov. Prikladnaya Khimiya i Biotehnologiya* [Proceedings of Universities. Applied Chemistry and Biotechnology], 2021, vol. 11, no. 1 pp. 34-52. (in Russian). <https://doi.org/10.21285/2227-2925-2021-11-1-34-52>

Korkina O.S., Sarapulova G.I., Zhdanova G.O., Gorbunova Yu.O., Ivanchikov E.A., Stom D.I., Beshkov V.N. Mikrobiologicheskii preparat «Doktor Robik 109» kak bioagent dlya polucheniya elektricheskogo toka v MTE pri dobavlenii zhirov [Microbiological preparation "Doctor Robik 109" as a bioagent for generating electric current in MFC with the addition of

fats] *Bul. Irkutsk St. Univ. Ser. Biol. Ecol.*, 2019, vol. 28, pp. 17-25. (in Russian). <https://doi.org/10.26516/2073-3372.2019.28.17>

Simayi K.Y., Abdeshahian P., Azman N.F., Chandrasekhar K., Kalil M.S. A comprehensive review of microbial electrolysis cells (MEC) reactor designs and configurations for sustainable hydrogen gas production. *Alex. Eng. J.*, 2016, vol. 55, pp. 427-443. <https://doi.org/10.1016/j.aej.2015.10.008>

Pourmadadi M., Shayeh J.S., Omidi M., Yazdian F., Alebouyeh M., Tayebi L. A glassy carbon electrode modified with reduced graphene oxide and gold nanoparticles for electrochemical aptasensing of lipopolysaccharides from *Escherichia coli* bacteria. *Microchim. Acta*, 2019, vol. 186, p. 787. <https://doi.org/10.1007/s00604-019-3957-9>

Al-Mamun A., Ahmad W., Baawain M.S., Khadem M., Dhar B.R. A review of microbial desalination cell technology: Configurations, optimization and applications. *J. Clean. Prod.*, 2018, vol. 183, pp. 458-480. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.02.054>

Stom D.I., Zhdanova G.O., Kalashnikova O.B., Bulaev A.G., Kashevskii A.V., Kupchinsky A.B., Vardanyan N.S., Ponamoreva O.N., Alferov S.V., Saksonov M.N., Chesnokova A.N., Tolstoy M.Yu. Acidophilic microorganisms *Leptospirillum* sp., *Acidithiobacillus* sp., *Ferroplasma* sp. as a cathodic bioagents in a MFC. *Geomicrobiol. J.*, 2021, vol. 38, no. 4, pp. 340-346. <https://doi.org/10.1080/01490451.2020.1856980>

Ali A., Audi M., Roussel Y. Natural Resources Depletion, Renewable Energy Consumption and Environmental Degradation: A Comparative Analysis of Developed and Developing. *Int. J. Energy Econ.*, 2021, vol. 11, no. 3, pp. 251-260. <https://doi.org/10.32479/ijeep.11008>

Zhang Y., Lv Z., Zhou J., Xin F., Ma J., Wu H., Fang Y., Jiang M., Dong W. Application of eukaryotic and prokaryotic laccases in biosensor and biofuel cells: recent advances and electrochemical aspects. *Appl. Microbiol. Biotechnol.*, 2018, vol. 102, pp. 10409-10423. <https://doi.org/10.1007/s00253-018-9421-7>

Mekawy E., Hegab H.M., Losic D., Saint C.P., Pant D. Applications of Graphene in Microbial Fuel Cells: The Gap between Promise and Reality. *Renew. Sust. Energ. Rev.*, 2017, vol. 72, pp. 1389-1403. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.10.044>

Vyatchina O.F., Stom D.I., Goel S., Xie B. Biocathode of microbial fuel cells based on nitrate-reducing strains of *Pseudomonas aeruginosa*. *IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci.*, 2020, vol. 408, 012084. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/408/1/012084>

Kuznetsov A.V., Khorina N.N., Konovalova E.Yu., Amsheev D.Yu., Ponamoreva O.N., Stom D.I. Bioelectrochemical processes of oxidation of dicarboxylic amino acids by strain *Micrococcus luteus* 1-I in a biofuel cell. *IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci.*, 2021, vol. 808, 012038. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/808/1/012038>

Jung S., Lee J., Park Y.-K., Kwon E.E. Bioelectrochemical systems for a circular bioeconomy. *Bioresour. Technol.*, 2020, vol. 300, 122748. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2020.122748>

Zhdanova G.O., Konovalova E.Yu., Tolstoy M.Yu., Kashevsky A.V., Barbora L., Goswami P., Goel S., Fialkow V.A., Kupchinsky A.B., Stom D.I. Comparative analysis of electrogenic activity of complex microbial preparations in microbial fuel cells. *IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci.*, 2019, vol. 272, 032161. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/272/3/032161>

Zhang S., You J., Kennes C., Cheng Z., Ye J., Chen D., Chen J., Wang L. Current advances of VOCs degradation by bioelectrochemical systems: A review. *Chem. Engin. J.*, 2018, vol. 334, pp. 2625-2637. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2017.11.014>

Jeuken L.J.C., Connell S.D., Nurnabi M., O'Reilly J., Henderson P.J.F., Evans S.D., Bushby R.J. Direct Electrochemical Interaction between a Modified Gold Electrode and a Bacterial Membrane Extract. *Langmuir*, 2005, vol. 21, pp. 1481-1488. <https://doi.org/10.1021/la047732f>

Logan B.E., Rossi R., Ragab A., Saikaly P.E. Electroactive microorganisms in bioelectrochemical systems. *Rev. Microbiol.*, 2019, vol. 17, pp. 307-319. <https://doi.org/10.1038/s41579-019-0173-x>

Bose D., Kandpal V., Dhawan H., Vijay P., Gopinath M. Energy Recovery with Microbial Fuel Cells: Bioremediation and Bioelectricity. *Waste Bioremediation. Energy, Environ-*

*ment, and Sustainability*. S. Varjani, E. Gnansounou, B. Gurunathan, D. Pant, Z. Zakaria (eds). Springer, Singapore, 2018. pp 7-33. [https://doi.org/10.1007/978-981-10-7413-4\\_2](https://doi.org/10.1007/978-981-10-7413-4_2)

Tian Y., Li D., Liu G., Li C., Liu J., Wu J., Liu J., Feng Y. Formate production from CO<sub>2</sub> electroreduction in a salinity-gradient energy intensified microbial electrochemical system. *Bioresour. Technol.*, 2021, vol. 320, part A, 124292. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2020.124292>

Glaven S. M. Bioelectrochemical systems and synthetic biology: more power, more products. *Microb. Biotechnol.*, 2019, vol. 12, no. 5, pp. 819-823. <https://doi.org/10.1111/1751-7915.13456>

Kochetkova D.A., Onishchenko A.K., Kalashnikova O.B., Zhdanova G.O., Stom D.I. Intensification of work of biofuel elements of heterogeneous metal complex catalysts "Catan". *19th Int. Sci. Geoconf. SGEM 2019*, 2019, vol. 19, is. 4.1, pp. 263-270

Kittl S.R., Ludwig R., Gorton L. Direct Electron Transfer from the FAD Cofactor of Cellobiose Dehydrogenase to Electrodes. *ACS Catalysis*, 2016, vol. 6, pp. 555-563. <https://doi.org/10.1021/acscatal.5b01854>

Konwar G.B.E., Mahanta D. Flexible Biofuel Cells: An Overview. *Biofuel Cells*. In: amuddin, M.I. Ahamed, R. Boddula, M. Rezakazemi (eds), 2021. <https://doi.org/10.1002/9781119725008.ch6>

Marshall C.W., Ross D.E., Fichot E.B., Norman R.S., May H.D. Long-term Operation of Microbial Electrosynthesis Systems Improves Acetate Production by Autotrophic Microbionomes. *Environ. Sci. Technol.*, 2013, vol. 47, pp. 6023-6029. <https://doi.org/10.1021/es400341b>

Mateos E.R., Martínez E.J., Blanes J. Microbial electrolysis cells: An emerging technology for wastewater treatment and energy recovery. From laboratory to pilot plant and beyond. *Renew. Sustain. Energy Rev.*, 2016, vol. 55, 942e956. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.11.029>

Yuriev D.A., Zaitseva S.V., Zhdanova G.O., Tolstoy M.Yu., Barkhutova D.D., Vyatchina O.F., Konovalova E.Yu., Stom D.I. Microbial mat of the thermal springs Kuchiger Republic of Buryatia: species composition, biochemical properties and electrogenic activity in biofuel cell. *IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci.*, 2018, vol. 121, 022012. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/121/2/022012>

Konovalova E.Yu., Barbora L., Chizhik K.I., Stom D.I. *Micrococcus luteus* and *Serratia marcescens*, as a new association of bioagents for microbial fuel cells. *IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci.*, 2020, vol. 408, Sustainable and Efficient Use of Energy, Water and Natural Resources: 2nd Int. Sci. Conf., 012080. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/408/1/012080>

Paquete C. M. Electroactivity across the cell wall of Gram-positive bacteria // *Comput Struct Biotechnol J*. 2020. Vol. 18. P. 3796-3802. doi: 10.1016/j.csbj.2020.11.021

Kuzu Ç.S., Erken E., Sert H., Koşkun Y., Şen F. Nearly Monodisperse Carbon Nanotube Furnished Nanocatalysts as Highly Efficient and Reusable Catalyst for Dehydrocoupling of DMAB and C1 to C3 Alcohol Oxidation. *Int. J. Hydrog. Energy.*, 2016, vol. 41, pp. 3093-3101. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2015.12.138>

Paquete C.M. Electroactivity across the cell wall of Gram-positive bacteria. *Comput. Struct. Biotechnol. J.*, 2020, vol. 18, pp. 3796-3802. <https://doi.org/10.1016/j.csbj.2020.11.021>

Guang L., Koomson D.A., Jingyu H., Ewusi-Mensah D., Miwornunyue N. Performance of Exoelectrogenic Bacteria Used in Microbial Desalination Cell Technology. *Int. J. Environ. Res. Public Health*, 2020, vol. 17, no. 3, p. 1121. <https://doi.org/10.3390/ijerph17031121>

Rasmussen M., Abdellaoui S., Minteer S.D. Enzymatic Biofuel Cells: 30 Years of Critical Advancements. *Biosens. Bioelectron.*, 2016, vol. 76, pp. 91-102. <https://doi.org/10.1016/j.bios.2015.06.029>

Olabi A.G., Wilberforce T., Sayed E.T., Elsaid K., Rezk H., Abdelkareem M.A. Recent progress of graphene based nanomaterials in bioelectrochemical systems. *Sci. Total Environ.*, 2020, vol. 749, 141225. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.141225>

Arsdale E.V., Pitzer J., Payne G.F., Bentley W.E. Redox Electrochemistry to Interrogate and Control Biomolecular Communication. *iScience*, 2020, vol. 23, no. 9, 101545. <https://doi.org/10.1016/j.isci.2020.101545>

Stom D.I., Zhdanova G.O., Kashevskii A.V. New designs of biofuel cells and testing of their work. *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.*, 2017, vol. 262, Int. Conf. on Construction, Architecture and Technosphere Safety, 012219. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/262/1/012219>

Jadhav D.A., Chendake A.D., Schievano A., Pant D. Suppressing methanogens and enriching electrogens in bioelectrochemical systems. *Bioresour. Technol.*, 2019, vol. 277, pp. 148-156. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2018.12.098>

Yan W., Xiao Y., Yan W., Ding R., Wang S., Zhao F. The effect of bioelectrochemical systems on antibiotics removal and antibiotic resistance genes: A review. *Chem. Eng. J.*, 2019, vol. 358, pp. 1421-1437. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2018.10.128>

Konovalova E.Yu., Stom D.I., Zhdanova G.O., Yuriev D.A., Li Y., Barbora L., Goswami P. The Microorganisms Used For Working In Microbial Fuel Cells. *AIP Conf. Proc.*, 2018, vol. 1952, 020017. <https://doi.org/10.1063/1.5031979>

Gorbunova Yu.O., Karpukhina L.S., Tolstoy M.Yu., Timofeeva S.S., Stom D.I. The production of biofuel and the generation of electricity by *Clostridium acetobutylicum* in microbial fuel cells. *18th Int. Sci. Geoconf SGEM 2018* (Albena, Bulgaria), 2018, vol. 18, Energy and Clean Technologies, is. 4.1, pp. 705-712.

Wang X., Cheng S., Feng Y., Merrill M.D., Saito T., Logan B.E. Use of Carbon Mesh Anodes and the Effect of Different Pretreatment Methods on Power Production in Microbial Fuel Cells. *Environ. Sci. Technol.*, 2009, vol. 43, pp. 6870-6874. <https://doi.org/10.1021/es900997w>

Wilberforce T., Sayed E.T., Abdelkareem M.A., Elsaid K., Olab A.G. Value added products from wastewater using bioelectrochemical systems: Current trends and perspectives. *J. Water Process Eng.*, 2021, vol. 39, 101737. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2020.101737>

Xafenias N., Mapelli V. Performance and bacterial enrichment of bioelectrochemical systems during methane and acetate production. *Int. J. Hydrogen Energy*, 2014, vol. 39, pp. 21864-21875. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2014.05.038>

Zhdanova G.O., Dukhnov S.S., Stom D.I. Single-cell biofuel element of simple construction from sanitary parts and testing of its work. *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.*, 2018, vol. 451, Int. Conf. on Construction, Architecture and Technosphere Safety, 012230. URL: <http://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/451/1/012230>

Zhdanova G.O., Stom D.I., Azarenko E.V. Elimination of nitrate ions in bio-fuel cells. *IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci.*, 2019, vol. 229, Prospects Mining and Metallurgy Industry Development, 012031. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/229/1/012031>

*Жданова Галина Олеговна*  
*ведущий инженер*  
*Иркутский государственный университет*  
*Россия, 664003, г. Иркутск, ул. К. Маркса, 1*  
*e-mail: zhdanova86@yandex.ru*

*Zhdanova Galina Olegovna*  
*Lead Engineer*  
*Irkutsk State University*  
*1, K. Marx st., Irkutsk, 664003,*  
*Russian Federation*  
*e-mail: zhdanova86@yandex.ru*

**Дата поступления:** 06.02.2021

**Received:** February, 06, 2021