

## МИКРОБНЫЕ ТОПЛИВНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ: СОСТОЯНИЕ ИССЛЕДОВАНИЙ И ПРАКТИЧЕСКОЕ ПРИМЕНЕНИЕ (ОБЗОР)

**О.В. Букач**, вед. научн. сотр. ФГБНУ НИИ РИНКЦЭ, канд. биол. наук,  
**Л.Л. Мякинкова**, нач. отд. ФГБНУ НИИ РИНКЦЭ, канд. биол. наук, [llm@extech.ru](mailto:llm@extech.ru)

*Данный обзор посвящен одному из направлений альтернативной энергетики – созданию и использованию микробных топливных элементов (МТЭ). Электрогенные микроорганизмы выступают в роли биологических катализаторов окисления органических веществ и передают электроны в электрическую цепь, производя тем самым электроэнергию. Микробные топливные элементы можно будет использовать в качестве источников питания начиная от небольших портативных электронных устройств, и до обеспечения электричеством подсобных хозяйств, жилых домов и других достаточно крупных объектов.*

**Ключевые слова:** электрогенные микроорганизмы, электрогенный биореактор, микробные топливные элементы (МТЭЛ).

## MICROBIAL FUEL CELLS: STATE OF RESEARCH AND PRACTICAL APPLICATION (REVIEW)

**O.V. Bukach**, Leading Researcher, SRI FRCEC  
**L.L. Myakinkova**, Head of Department, SRI FRCEC, Doctor of Biology, [llm@extech.ru](mailto:llm@extech.ru)

*This review focuses on one of the areas of alternative energy – creation and use of microbial fuel cells (MFC). Electrogenic microorganisms act as biological catalysts of oxidation of organic matter and transfer electrons in an electrical circuit, thereby producing electricity. Microbial fuel cells can be used as power sources ranging from small portable electronic devices, up to power supply of farms, houses and other objects large enough.*

**Keywords:** electrogenic microorganisms, electrogenic bioreactor, microbial fuel elements, microbial fuel cells (MFC).

Загрязнение окружающей среды и истощение ресурсов заставляет человека искать новые, экологически безвредные и возобновляемые источники энергии. Тепловые электростанции производят энергию за счет сжигания (окисления) невозобновляемого топлива. Существует возможность производить энергию напрямую при окислении различных химических соединений в так называемых топливных элементах (ТЭ) или топливных ячейках, тем самым уменьшая потери, в том числе в виде тепла на промежуточных стадиях процесса. Топливный элемент схож с гальваническим, однако в случае ТЭ не происходит расходования материала электродов, окислитель и восстановитель подаются извне. Обычно в химических ТЭ на аноде катализируется передача электронов водорода или метанола на анод, а на катоде происходит реакция восстановления кислорода. Теоретически в химических ТЭ коэффициент преобразования химической энергии в электрическую может достигать 80 %.

В 1911 г. впервые была показана возможность использования активности микроорганизмов для генерирования электрического потенциала [1], однако лишь в последние 10–15 лет применение микроорганизмов в качестве биологических катализаторов в топливных элементах начало активно развиваться. Повышенный интерес и возможные перспективы использования микробных биоэлектрических систем связаны с открытием новых видов мик-

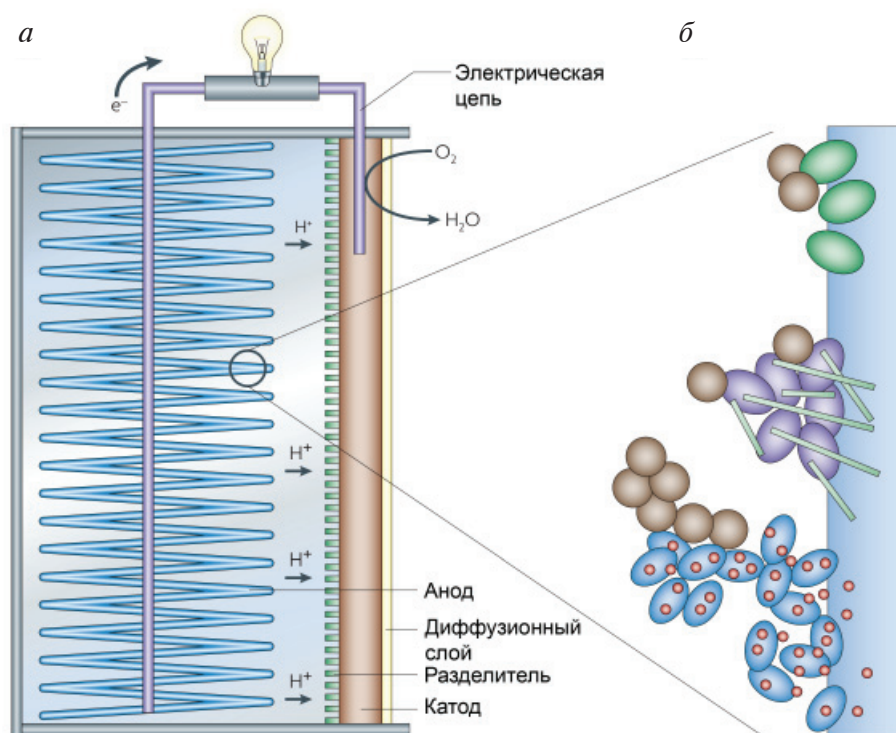
роорганизмов, например, таких как *Shewanella* и *Geobacter*, способных использовать нерастворимые акцепторы протонов [2]. Начиная с 2002 г. число публикаций в этой области возросло экспоненциально [1]. Выросло количество исследовательских групп, и на данный момент уже более 100 научных коллективов работает в области разработки микробных ТЭ. Увеличение количества специалистов, вовлеченных в эти исследования, привело к созданию обществ, объединяющих как ученых, так и инженеров, например – ISMET (International Society for Microbial Electrochemical Technologies – Международное общество микробных электрохимических технологий) [3].

В микробных топливных элементах (МТЭЛ, MFC – microbial fuel cell) окисление органического субстрата (например, глюкозы или ацетата) производят особенные электрогенные микроорганизмы, которые способны затем перенести электроны на анод. Электроны по электрической цепи попадают на катод и соединяются с протонами и электрохимически активированным катализатором. Зачастую восстановление кислорода активируется катализаторами из ценных металлов, таких как платина, но и другие материалы тоже могут быть использованы [4].

На рис. 1-а представлен пример возможной схемы микробного топливного элемента. Анод представляет собой своеобразную «щетку», сделанную из волокон графита, на поверхности которого растут электрогенные микроорганизмы, образуя биопленку. Углеродный катод покрыт катализатором со стороны жидкости. Диффузионный слой, разделяющий анодную анаэробную и катодную камеры, и сделанный, например, из политетрафторэтилена (PTFE) располагается со стороны, обращенной к воздуху. Ионы кислорода восстанавливаются до воды, забирая протоны из воды и электроны из электрической цепи.

На рис. 1-б схематически представлены возможные разновидности электрогенных микроорганизмов, живущих в биопленке на аноде. Как было сказано выше, интерес к микробным топливным элементам значительно усилился после открытия микроорганизмов, способных передавать электроны на твердый анод путем прямого контакта (обозначены зеленым на рис. 1-б). Одним из наиболее изученных микроорганизмов этого типа является *Geobacter metallireducens* [5]. На внешней поверхности клеток этого микроба находится фермент, способный переносить электроны, полученные в результате ферментативного постадийного окисления органического субстрата внутри клетки, на  $Fe^{3+}$ , находящийся в среде. За счет этой способности бактерии семейства *Geobacteraceae*, и другие металл-восстанавливающие микробы играют важную роль в круговороте железа в природе, переводя его из нерастворимой в растворимую форму. Некоторые микроорганизмы, такие как *Shewanella oneidensis* [6] или *Geobacter sulfurreducens* [7] образуют для контакта так называемые «нанопровода» (nanowires) – электропроводящие выросты на поверхности клетки, содержащие белки, которые способны переносить электроны (обозначено фиолетовым цветом на рис. 1-б).

Топливные элементы, основанные на использовании подобных микроорганизмов, называют безмедиаторными [8]. В такой схеме нет необходимости добавлять извне вещества-переносчики электронов (медиаторы), такие как тионин, метилвиологен, феррицианид и др., что повышает эффективность ТЭ, как в плане интенсивности переноса электронов, так и удобства практического использования. Многие из этих медиаторов являются дорогими или токсичными, поэтому отказ от них снижает стоимость использования МТЭЛ и уменьшает загрязнение окружающей среды [9]. Возможно применять микроорганизмы, которые используют эндогенные переносчики электронов, то есть такие переносчики, которые синтезируются клетками. В этом случае также нет необходимости добавлять медиаторы (голубые на рис. 1-б). Хорошие результаты показаны при использовании в МТЭЛ сообществ микроорганизмов, которые включают и неэлектрогенные микроорганизмы (коричневые на рис. 1-б). Интересно, что в некоторых случаях биопленка, образованная смешанной культурой, в которой присутствовали электрогенные и неэлектрогенные микроорганизмы, давала большую плотность тока, чем монокультура [10, 11].



**Рис. 1. Возможная схема микробного топливного элемента**

*a* – схема микробного топливного элемента;  
*б* – схематическое представление разнообразных типов электрогенных сообществ микроорганизмов

Подбор культуры микроорганизмов для употребления в МТЭЛ является одним из ключевых вопросов, и поиски новых штаммов, изучение их биохимии, и даже искусственное создание микроорганизмов с новыми возможностями проводятся очень активно в последние годы. Ограничения, которые накладываются на использование того или иного вида электрогенных микробов, могут быть самими различными. В основном это спектр используемых органических веществ-субстратов [12]. Например, упомянутые выше бактерии семейства *Geobacteraceae* могут утилизировать в качестве донора электронов лишь ограниченный круг веществ, такие как ацетат, этанол и жирные кислоты. Таким образом, МТЭЛ на основе этих микроорганизмов, несмотря на то, что выдают достаточно большую плотность энергии, будут обладать ограниченной областью применения, и их использование будет лимитироваться ценой и доступностью субстратов. Частично решить эту проблему можно заселяя анод не монокультурой, а консорциумом микроорганизмов, в который входят электрогенные бактерии и бактерии, которые способны перерабатывать имеющиеся в наличии органические вещества в вещества-субстраты потребляемые бактериями, производящими электричество. Естественно, при подборе культур необходимо учитывать и других особенности биохимии и физиологии используемых микроорганизмов, которые могут либо облегчить, либо усложнить конструкцию топливного элемента, например, чувствительность к кислороду и другим веществам, могущим содержаться или образовываться в катодите в процессе работы ТЭ.

Спектр используемых субстратов является особенно важным при разработке МТЭЛ, которые будут предназначены для очистки сточных вод и одновременной выработки электри-

чества — одной из самых перспективных областей их применения. Интересными в этом плане могут быть термофильные микроорганизмы. Термофилы имеют оптимум роста при повышенных температурах свыше 45–50 °С, в то время как для обычных микроорганизмов оптимальная температура обычно составляет 20–30 °С. Повышение температуры МТЭЛ несет несколько преимуществ. Во-первых, с термодинамической точки зрения: в системе при повышенной температуре увеличивается массоперенос. Во-вторых, снижается риск контаминации ячейки посторонними микроорганизмами, большинство из которых не могут нормально расти при повышенных температурах. В-третьих, снижается растворимость кислорода в воде, что способствует поддержанию анаэробных условий в анодной камере [13, 14].

Биоэлектрохимические системы не ограничиваются МТЭЛ, и в качестве биологического катализатора электрогенных реакций в топливных элементах могут выступать не только целые микроорганизмы, но и отдельные ферменты или ферментативные каскады. В энзиматическом ТЭ на катоде обычно иммобилизованы ферменты из класса оксидоредуктаз, которые осуществляют окислительно-восстановительные реакции и поставляют электроны в электрическую цепь топливного элемента. Энзиматические топливные элементы (ЭТЭЛ, EFC — enzymatic fuel cell) имеют как ряд преимуществ, так и недостатков по сравнению с МТЭЛ.

К недостаткам энзиматических ТЭ можно отнести необходимость выделения и очистки ферментов, что обычно оказывается значительно дороже, чем культивация микроорганизмов. Следующую проблему создания ЭТЭЛ может составить иммобилизация белка-фермента на электродах, которая может приводить к снижению его активности. Бактерии же могут прикрепляться к аноду без дополнительного воздействия и образовывать на нем активные биопленки. Выше уже обсуждался вопрос субстратных предпочтений бактерий, но при разработке ЭТЭЛ он становится более актуальным, поскольку ферменты являются более специфичными. К тому же в живой клетке проходит целый каскад ферментативных реакций, в результате которого может быть достигнуто полное окисление органического субстрата до углекислого газа и, таким образом, более полное высвобождение химической энергии по сравнению с единственной реакцией, осуществляемой одним ферментом. С другой стороны, часть этой энергии в МТЭЛ теряется, поскольку тратится микробами на поддержание собственного метаболизма. Более полное окисление, и соответственно, выход энергии на грамм субстрата в энзиматических элементах может быть достигнуто использованием не одного, а нескольких очищенных ферментов (или клеточного лизата), катализирующих последовательные реакции [15]. Несмотря на перечисленные недостатки, энзиматические ТЭ все же имеют свои перспективы в некоторых приложениях, поскольку для них удается достичь более высокой плотности энергии по сравнению как с МТЭЛ, так и с традиционными гальваническими элементами. Так в работе 2014 г. [16] описан энзиматический топливный элемент, который по этому показателю на порядок превосходит современные литиевые аккумуляторы. Благодаря этому свойству, а так же меньшей опасности для здоровья, чем МТЭЛ (микроорганизмы могут оказаться патогенными) ЭТЭЛ возможно смогут найти свою нишу в области альтернативных источников энергии для определенного круга задач. Более подробно потенциальные сферы применения как МТЭЛ, так и ЭТЭЛ, описаны ниже.

Микроорганизмы являются важной частью МТЭЛ, но и его конструкция может играть ключевую роль в перспективности использования. Архитектура, то есть материал и размеры электродов, расстояние между ними, состав электролита и так далее, во многом определяют максимальную плотность тока в элементе. Например, снижение внутреннего сопротивления системы позволяет получить большую плотность тока при использовании тех же штаммов микроорганизмов [17]. Если говорить о разработке МТЭЛ для практического применения, то экономическую целесообразность и перспективность той или иной конструкции ячейки определяет в основном цена ее компонентов.

Цена электродов играет большую роль в экономической эффективности микробных элементов. Даже в оптимизированных промышленных реакторах, основанных на МТЭЛ, цена электродов может достигать до половины цены всего реактора [18]. Как уже упоминалось выше, зачастую в качестве катодного катализатора восстановления кислорода используется такой дорогой материал, как платина, и исследователи работают над поиском ее замены для снижения стоимости. В разработке находятся так называемые биокатоды, в которых перенос электрона с катода на конечный акцептор, так же как и на аноде, производят микроорганизмы, что позволяет отказаться от использования дорогих металлов. Биоэлектрические системы с такими электродами обычно называются микробными электролизными элементами.

Недавно была предложена интересная технология создания более дешевого материала для электродов из лигнитового полукокса, путем достаточно простой процедуры карбонизации [19]. Полученный в результате материал дешев, и подходит для использования как в анодах, так и в биокатодах. Были использованы стебли растения кенаф, обработанные при помощи карбонизации, и получены недорогие и достаточно эффективные аноды с трехмерной структурой, отлично подходящие для роста биопленки и позволяющие получить плотность тока, сравнимую с 3D электродами, сделанными по другим технологиям [20].

Микробиологические и электрохимические исследования, проведенные в области создания микробных топливных элементов, на данный момент сделали возможным промышленное применение МТЭЛ. Практическое применение МТЭЛ впервые было описано в 2008 г. Батарея топливных элементов, в которых использовались электрогенные микроорганизмы из морских донных отложений, была использована как источник энергии для метеорологического буя [21]. Масса такого источника тока составляла 16 кг, объем – 0,03 м<sup>2</sup>, при этом в течение года поддерживалась мощность 36 мВт, эквивалентная мощности 26 щелочных батарей (цит. по [13]). Исходный образец был не слишком эффективен, и обладал некоторыми недостатками, однако последующее развитие технологии МТЭЛ позволило создать рентабельные разработки. Как уже упоминалось выше, одним из основных препятствий является высокая стоимость материалов, используемых для создания ТЭ, но активность исследований в этой области приводит к постоянному появлению все более дешевых и доступных материалов и конструкций.

Другой компонент стоимости использования МТЭЛ – это используемый субстрат для микроорганизмов. Бактерии в топливном элементе окисляют вещества, такие как глюкоза, ацетат, и некоторые другие органические соединения, источниками которых является биомасса. Однако расчеты показывают, что специальное выращивание растений для последующей их переработки в топливо для МТЭЛ экономически нецелесообразно, поскольку стоимость производства органических субстратов из биомассы превосходит стоимость получаемого электричества в несколько раз.

Крайне перспективной и активно развивающейся областью применения МТЭЛ является очистка сточных вод, богатых органическими веществами. Такие отходы характерны для пищевого и сельскохозяйственного производства, в частности, пивоварен, предприятий молочной промышленности, производства соков и т. д. Обычно сточные воды таких предприятий очищаются на полях фильтрации, или более прогрессивными методами, такими как биологическая очистка с помощью активированного ила. Однако в этих случаях требуются или большие площади, занятые под очистку стоков, или затраты энергии на работу системы биоочистки. Использование МТЭЛ вместо стандартных биореакторов на этапе биологической очистки воды от органических загрязнений позволяет не только не расходовать электроэнергию на этом этапе, а более того, даже производить ее. В качестве примера подобного использования МТЭЛ можно привести технологию EBR (Electrogenic Bio Reactor – электрогенный биореактор), созданную израильской компанией Emefcy [22]. Эта технология признана эффективной и многообещающей. В начале 2014 г. журнал Форбс, одно из авторитет-

нейших финансово-экономических изданий в мире, назвал компанию Emefcy в числе наиболее привлекательных стартапов в области очистки воды (Cleantech Water Sector) [23].

Не менее интересной разработкой является технология EcoVolt, созданная компанией Cambrian Innovation, находящейся в США (рис. 2). Эта компания занимается разработкой решений для закрытых циклов использования ресурсов, в том числе и с использованием биоэлектрохимических технологий. Целью этой компании является снижение потребления электроэнергии системами очистки воды, которое в США составляет 2–3% от общих потребностей в электроэнергии. Технология EcoVolt разработана специально для пивоварен и других предприятий пищевой промышленности, и предназначена для очистки стоков с попутным получением энергии из органических загрязняющих веществ. Система, используемая в этой технологии, не является в полном понимании системой, использующей МТЭЛ, однако тоже основана на применении электрогенной активности микроорганизмов: в процессе, называемом электрометаногенезом. На аноде, точно также как и в типичном МТЭЛ, электрохимически активные микроорганизмы окисляют органические соединения, находящиеся в сточной воде, тем самым нейтрализуя их, и вместе с тем поставляют электроны в электрическую цепь. В катодной камере другие микроорганизмы используют электричество, протоны и  $\text{CO}_2$  и производят метан, который в дальнейшем может быть использован как топливо [23]. Таким образом, вместо использования огромных площадей для полей аэрации, или затрат электроэнергии на аэрацию биореакторов для биоочистки стоков, технология позволяет извлекать энергию, запасенную в загрязняющих органических веществах, попутно удаляя их из сточных вод [24].

Внедрение топливных элементов в других областях пока находится на стадиях научных исследований или пилотных проектов, однако обещает перспективные приложения. Помимо масштабного производства электроэнергии, на основе МТЭЛ предлагается создавать и небольшие портативные источники энергии, например для электронных устройств. В начале 2014 г. группой исследователей из Университета Пенсильвании (США) было представлено



**Рис. 2. Схема очистных сооружений EcoVolt, включающая модуль биоэлектрической очистки воды, который позволяет проводить глубокую очистку сточных вод с одновременной выработкой электроэнергии**

устройство на основе МТЭЛ, которое получает электроэнергию из слюны человека. Авторы разработки предлагают в качестве одного из возможных использований подобных устройств чип для определения овуляции. Небольшой прибор по электропроводности слюны определяет наступление овуляции, а электроэнергия, вырабатываемая МТЭЛ из веществ, содержащихся в слюне, требуется ему для передачи данных на ближайший мобильный телефон [25].

Возможно, в некоторых случаях энзиматические ТЭ подойдут на роль компактных портативных источников тока даже лучше, чем МТЭЛ, поскольку в них можно достичь более высокой плотности энергии. В одной из последних разработок исследователи использовали искусственный ферментативный каскад из 13 белков, который позволил достичь достаточно глубокого окисления мальтодекстрина, что естественным образом увеличило плотность энергии ТЭ. Такой недостаток энзиматических ТЭ, как малая стабильность и время полужизни ферментов был решен за счет использования белков термофильных и гипертермофильных микроорганизмов. Авторы работы полагают, что энзиматические топливные элементы могут стать экологически чистой, безопасной, энергетически емкой и быстро перезаряжаемой заменой литиевым аккумуляторам в портативных электронных устройствах [16].

Подводя итог, можно сказать, что область разработки микробных топливных элементов является активно развивающейся и перспективной. На данном этапе развитие преимущественно происходит в области научных исследований по созданию новых лабораторных образцов микробных топливных элементов. Исследования направлены на поиск новых штаммов и консорциумов микроорганизмов, более дешевых материалов для электродов и более совершенных конструкций самих топливных элементов, что необходимо для увеличения энергетической эффективности МТЭЛ и снижения их себестоимости. Одновременно с исследованиями постепенно начинается и практическое внедрение МТЭЛ, основным применением которых на данный момент является очистка сточных вод с одновременным получением электроэнергии. Представляется вполне вероятным, что результаты научного поиска сделают возможным применение потенциала электрогенных микроорганизмов в качестве источника энергии и в других областях высокотехнологичного производства.

### **Список литературы**

1. Schröder U. Microbial Fuel Cells and Microbial Electrochemistry: Into the Next Century! // *ChemSusChem.*, 2012. № 5. С. 959–961.
2. Lovley D.R. et al. Geobacter: The Microbe Electric's Physiology, Ecology, and Practical Applications // *Adv. Microb. Physiol.*, 2011. № 59. С. 1–100.
3. Международное общество микробной электрохимии и технологии (International Society for Microbial Electrochemistry and Technology – ISMET). Available at: <http://www.ismet.ugent.be>.
4. Logan B.E. Exoelectrogenic bacteria that power microbial fuel cells // *Nat Rev Microbiol*, 2009. № 7(5). С. 375–381.
5. Lovley D.R. Dissimilatory Metal Reduction // *Annual Review of Microbiology*, 1993. № 47. С. 263–290.
6. Gorby Y.A. et al. Electrically conductive bacterial nanowires produced by *Shewanella oneidensis* strain MR-1 and other microorganisms // *PNAS*, 2006. № 103. С. 11358–11363.
7. Reguera G. et al. Extracellular Electron Transfer via Microbial Nanowires // *Nature*, 2005. № 435. С. 1098–1101.
8. Chaudhuri S.K. et al. Electricity generation by direct oxidation of glucose in mediatorless microbial fuel cells // *Nature Biotechnology*, 2003. № 21. С. 1229–1232.
9. Park D.H., Zeikus, J.G. Electricity generation in microbial fuel cells using neutral red as an electronophore // *Appl. Environ. Microbiol.*, 2000. № 66 (4). С. 1292–1297.
10. Rabaey K. et al. Biofuel cells select for microbial consortia that self-mediate electron transfer // *Appl. Environ. Microbiol.*, 2004. № 70. С. 5373–5382.
11. Pham T.H. et al. Metabolites produced by *Pseudomonas* sp. enable a Gram positive bacterium to achieve extracellular electron transfer // *Appl. Microbiol. Biotechnol.*, 2008. № 77. С. 1119–1129.

12. Bond D.R., Lovley D.R. Electricity Production by *Geobacter sulfurreducens* Attached to Electrodes // *Appl. Environ. Microbiol.*, 2003. № 69(3). С. 1548–1555.
13. Соколова Т.Г. Аналитический документ эксперта ФРЭ Минобрнауки РФ Получение электричества в микробных топливных элементах на основе анаэробных термофильных микроорганизмов. 2013.
14. Jong B.C. et al. Enrichment, performance, and microbial diversity of a thermophilic mediatorless microbial fuel cell // *Environ. Sci. Technol.*, 2006. № 40(20). С. 6449–6454.
15. Lapinonnire L. et al. Enzymatic versus Microbial Bio-Catalyzed Electrodes in Bio-Electrochemical Systems // *ChemSusChem.*, 2012. № 5(6). С. 995–1005.
16. Zhu Zh. et al. A high-energy-density sugar biobattery based on a synthetic enzymatic pathway // *Nat. Commun.*, 2014. № 5. С. 1–8.
17. Sleutels T.H.J.A. et al. Bioelectrochemical Systems: An Outlook for Practical Applications // *ChemSusChem.*, 2012. № 5. С. 1012–1019.
18. Rozendal R.A. Towards practical implementation of bioelectrochemical wastewater treatment // *Trends Biotechnol.*, 2008. № 26(8). С. 450–459.
19. Wei J. et al. Carbonization and Activation of Inexpensive Semicoke-Packed Electrodes to Enhance Power Generation of Microbial Fuel Cells // *ChemSusChem.*, 2012. № 5(6). С. 1065–1070.
20. Chen S. et al. A Three-Dimensionally Ordered Macroporous Carbon Derived From a Natural Resource as Anode for Microbial Bioelectrochemical Systems // *ChemSusChem.*, 2012. № 5(6). С. 1059–1063.
21. Tender L.M. et al. The first demonstration of a microbial fuel cell as a viable power supply: Powering a meteorological buoy // *Journal of Power Sources*, 2008. № 179. С. 571–575.
22. Интернет-сайт компании Emefcy Ltd. Available at: <http://www.emefcy.com>.
23. 9 Startups Tapping the \$600 Billion Cleantech Water Sector // *Forbes*, 2014. Режим доступа: <http://www.forbes.com/sites/heatherclancy/2014/01/22/9-startups-tapping-the-600-billion-cleantech-water-sector>.
24. Интернет-сайт компании Cambrian Innovation Inc. Available at: <http://cambrianinnovation.com/resources/cambrian-technology>.
25. Tiny power generator runs on spit. Penn State News. Available at: <http://news.psu.edu/story/310362/2014/04/03/research/tiny-power-generator-runs-spit>.

## References

1. Schröder U. Microbial Fuel Cells and Microbial Electrochemistry: Into the Next Century! *ChemSusChem.*, 2012, no. 5, p. 959–961.
2. Lovley D.R. et al. *Geobacter*: The Microbe Electric's Physiology, Ecology, and Practical Applications. *Adv. Microb. Physiol.*, 2011, no. 59, p. 1–100.
3. *Mezhdunarodnoe obshchestvo mikrobnoy elektrokhemii i tekhnologii* [International Society of Electrochemistry and microbial technology (International Society for Microbial Electrochemistry and Technology – ISMET)]. Available at: <http://www.ismet.ugent.be>.
4. Logan B.E. Exoelectrogenic bacteria that power microbial fuel cells. *Nat Rev Microbiol*, 2009, no. 7(5), p. 375–381.
5. Lovley D.R. Dissimilatory Metal Reduction. *Annual Review of Microbiology*, 1993, no. 47, p. 263–290.
6. Gorby Y.A. et al. Electrically conductive bacterial nanowires produced by *Shewanella oneidensis* strain MR-1 and other microorganisms. *PNAS*, 2006, no. 103, p. 11358–11363.
7. Reguera G. et al. Extracellular Electron Transfer via Microbial Nanowires. *Nature*, 2005, no. 435, p. 1098–1101.
8. Chaudhuri S.K. et al. Electricity generation by direct oxidation of glucose in mediatorless microbial fuel cells. *Nature Biotechnology*, 2003, no. 21, p. 1229–1232.
9. Park D.H., Zeikus J.G. Electricity generation in microbial fuel cells using neutral red as an electronophore. *Appl. Environ. Microbiol.*, 2000, no. 66 (4), p. 1292–1297.



10. Rabaey K. et al. Biofuel cells select for microbial consortia that self-mediate electron transfer. *Appl. Environ. Microbiol.*, 2004, no. 70, p. 5373–5382.
11. Pham T.H. et al. Metabolites produced by *Pseudomonas* sp. enable a Gram positive bacterium to achieve extracellular electron transfer. *Appl. Microbiol. Biotechnol.*, 2008, no. 77, p. 1119–1129.
12. Bond D.R., Lovley D.R. Electricity Production by *Geobacter sulfur reducens* Attached to Electrodes. *Appl. Environ. Microbiol.*, 2003, no. 69(3), p. 1548–1555.
13. Sokolova T.G. (2013) *Analiticheskiy dokument eksperta FRE Minobrnauki RF Poluchenie elektrichestva v mikrobykh toplivnykh elementakh na osnove anaerobnykh termofil'nykh mikroorganizmov* [Analytical document of EDF expert, Ministry of Education and Science of RF. Power generation in microbial fuel cells based on anaerobic thermophilic microorganisms].
14. Jong B.C. et al. Enrichment, performance, and microbial diversity of a thermophilic mediatorless microbial fuel cell. *Environ. Sci. Technol.*, 2006, no. 40(20), p. 6449–6454.
15. Lapinsonnire L. et al. Enzymatic versus Microbial Bio-Catalyzed Electrodes in Bio-Electrochemical Systems. *ChemSusChem.*, 2012, no. 5(6), p. 995–1005.
16. Zhu Zh. et al. A high-energy-density sugar biobattery based on a synthetic enzymatic pathway. *Nat. Commun.*, 2014, no. 5, p. 1–8.
17. Sleutels T.H.J.A. et al. Bioelectrochemical Systems: An Outlook for Practical Applications. *ChemSusChem.*, 2012, no. 5, p. 1012–1019.
18. Rozendal R.A. Towards practical implementation of bioelectrochemical wastewater treatment. *Trends Biotechnol.*, 2008, no. 26(8), p. 450–459.
19. Wei J. et al. Carbonization and Activation of Inexpensive Semicoke-Packed Electrodes to Enhance Power Generation of Microbial Fuel Cells. *ChemSusChem.*, 2012, no. 5(6), p. 1065–1070.
20. Chen S. et al. A Three-Dimensionally Ordered Macroporous Carbon Derived From a Natural Resource as Anode for Microbial Bioelectrochemical Systems. *ChemSusChem.*, 2012, no. 5(6), p. 1059–1063.
21. Tender L.M. et al. The first demonstration of a microbial fuel cell as a viable power supply: Powering a meteorological buoy. *Journal of Power Sources*, 2008, no. 179, p. 571–575.
22. *Internet-sayt kompanii Emefcy Ltd* [Emefcy Ltd. Co Website]. Available at: <http://www.emefcy.com>.
23. 9 Startups Tapping the \$600 Billion Cleantech Water Sector. *Forbes*, 2014. Available at: <http://www.forbes.com/sites/heatherclancy/2014/01/22/9-startups-tapping-the-600-billion-cleantech-water-sector>.
24. *Internet-sayt kompanii Cambrian Innovation Inc* [Cambrian Innovation Inc. Co Website]. Available at: <http://cambrianinnovation.com/resources/cambrian-technology>.
25. Tiny power generator runs on spit. *Penn State News*. Available at: <http://news.psu.edu/story/310362/2014/04/03/research/tiny-power-generator-runs-spit>.