

DOI: 10.17516/1999-494X-0405

УДК 504.062.2

## Obtaining Environmentally Friendly Energy from the Biomass of Extremophilic Organisms

Elizaveta R. Faskhutdinova<sup>\*a</sup>, Maragarita Yu. Drozdova<sup>a</sup>,  
Anastasia I. Dmitrieva<sup>a</sup> and Ruslan D. Bakeev<sup>b</sup>

<sup>a</sup>*Kemerovo State University  
Kemerovo, Russian Federation*

<sup>b</sup>*Gymnasium № 42  
Kemerovo, Russian Federation*

Received 04.06.2022, received in revised form 11.06.2022, accepted 24.06.2022

**Abstract.** The environmental situation forces us to look for an alternative to traditional fuels. The interest of researchers has recently been directed to microbial fuel cells (MFC) and the production of environmentally friendly energy with the help of microorganisms without environmental pollution. A little studied, but promising direction is the use of extremophilic microorganisms capable of existing in extreme conditions. An example of such bacteria are iron bacteria that live in the soils of coal dumps. Wastewater components can serve as a substrate for MFC. The aim of the study is to obtain bioenergy with the help of iron bacteria. As a result, 5 isolated cultures of iron bacteria were isolated by cultivating a suspension of the soil of the Mokhovskiy coal dump. A number of studies have been conducted on the selection of optimal operating conditions for MFC. It was found that cultures № 1 and № 2 are extremophilic, since they generated the maximum voltage (350,9 mV and 346,8 mV) in a medium with pH=3. It is confirmed that the cultures selected in this way are biocompatible. A consortium of these cultures was compiled in a ratio of 1:1, which was used in further experiments. As a result of the study, it was found that the most optimal temperature for the operation of the MFC is 37 °C, while the consortium of bacteria generated a voltage of 256,1 mV. The most optimal operating time of the MTE was 48 hours, after which the bacteria generated a voltage of 212,3 mV. The most optimal substrate for loading into the MFC was a medium containing glucose and a solution of trace elements. On this substrate, the bacteria generated a voltage of 403,4 mV. After the optimal time of the experiment, the clarification of substrate No. 1 and precipitation to the bottom of the chamber were recorded, which indicates that MFC can also be used for wastewater treatment.

**Keywords:** bioenergy, extremophilic microorganisms, microbial fuel cell, iron bacteria, wastewaters.

Citation: Faskhutdinova, E. R., Drozdova, M. Yu., Dmitrieva, A. I., Bakeev, R. D. Obtaining environmentally friendly energy from the biomass of extremophilic organisms. J. Sib. Fed. Univ. Eng. & Technol., 2022, 15(4), 435–447. DOI: 10.17516/1999-494X-0405

## Получение экологически чистой энергии из биомассы экстремофильных организмов

Е. Р. Фасхутдинова<sup>а</sup>, М. Ю. Дроздова<sup>а</sup>,  
А. И. Дмитриева<sup>а</sup>, Р. Д. Бакеев<sup>б</sup>

<sup>а</sup>Кемеровский государственный университет  
Российская Федерация, Кемерово

<sup>б</sup>Муниципальное автономное общеобразовательное учреждение  
Гимназия № 42  
Российская Федерация, Кемерово

**Аннотация.** Экологическая обстановка вынуждает искать альтернативу традиционным видам топлива. Интерес исследователей в последнее время направлен на микробные топливные элементы (МТЭ) и получение экологически чистой энергии с помощью микроорганизмов без загрязнения окружающей среды. Мало изученным, но перспективным направлением стало использование экстремофильных микроорганизмов, способных существовать в экстремальных условиях. Примером таких бактерий являются железобактерии, обитающие в почвах угольных отвалов. Субстратом для МТЭ могут служить компоненты сточных вод. Цель исследования – получение биоэнергии с помощью железобактерий. В результате выделено 5 изолированных культур железобактерий путем культивирования суспензии почвы угольного отвала «Моховский». Проведен ряд исследований по подбору оптимальных условий эксплуатации МТЭ. Установлено, что культуры № 1 и № 2 экстремофильные, так как генерировали максимальное напряжение (350,9 мВ и 346,8 мВ) в среде с рН=3. Подтверждено, что отобранные таким образом культуры биосовместимы. Составлен консорциум данных культур в соотношении 1:1, который использовали в дальнейших экспериментах. По итогам исследования установлено, что наиболее оптимальная температура для эксплуатации МТЭ – 37 °С, консорциум бактерий при этом генерировал напряжение 256,1 мВ. Наиболее оптимальным временем эксплуатации МТЭ определено 48 ч, по прошествии которого бактерии генерировали напряжение 212,3 мВ. Наиболее оптимальным субстратом для загрузки в МТЭ оказалась среда, содержащая в своем составе глюкозу и раствор микроэлементов. На этой подложке бактерии генерировали напряжение 403,4 мВ. По прошествии оптимального времени эксперимента зафиксировано осветление субстрата № 1 и выпадение осадка на дно камеры, что свидетельствует о том, что МТЭ может также использоваться для очистки сточных вод.

**Ключевые слова:** биоэнергия, экстремофильные микроорганизмы, железобактерии, микробный топливный элемент, сточные воды.

Цитирование: Фасхутдинова, Е. Р. Получение экологически чистой энергии из биомассы экстремофильных организмов / Е. Р. Фасхутдинова, М. Ю. Дроздова, А. И. Дмитриева, Р. Д. Бакеев // Журн. Сиб. федер. ун-та. Техника и технологии, 2022, 15(4). С. 435–447. DOI: 10.17516/1999-494X-0405

### Введение

Основным и наиболее эффективным источником энергии в течение последних десятилетий является ископаемое топливо. Однако запасы данного топлива не безграничны, а его подземные источники быстро истощаются ввиду растущей за последние годы потребности мирового сообщества. Главный недостаток традиционных источников энергии – их негативное воздействие на окружающую среду. В частности, углекислый газ, вырабатываемый в резуль-

тате сжигания топлива, попадает в атмосферу, нанося ей серьезный урон. Согласно данным Федеральной службы государственной статистики (Росстат), в 2020 году всего было выброшено 22,2 млн т загрязняющих атмосферу веществ (из них почти 2/3 – стационарными источниками загрязнения) [1]. При этом на основе данных Росгидромета установлено, что в 2021 году побит рекорд по количеству зафиксированных случаев загрязнения воздуха (доля таких случаев увеличилась на 23 %) [2]. Несмотря на то что в мире наблюдается тенденция снижения количества выбросов в атмосферу, данная проблема всё еще требует эффективного решения. Из-за сложившейся ситуации необходима срочная замена традиционных на альтернативные источники энергии, которые причиняли бы окружающей среде меньший урон. Использование возобновляемых источников приведет к снижению количества парниковых газов, выбрасываемых в атмосферу [3], а также избавит страны от зависимости по отношению к традиционному топливу [4].

В последнее десятилетие вниманием ученых завладела новая технология, позволяющая получать энергию с помощью микроорганизмов. Данная технология получила название микробного топливного элемента (МТЭ). Использование отходов в качестве источника энергии имеет неплохие перспективы.

МТЭ представляет собой реактор, в основе работы которого заложен микробный метаболизм для генерации биоэлектричества [5]. Субстратом для МТЭ могут стать как простые органические молекулы, так и сложные соединения. При этом на анодном электроде образуется биопленка, колонии которой расщепляют органический субстрат с выходом электроэнергии [6]. Ученые выяснили, что бактерии расщепляют сложные субстраты на простые молекулы, которые потребляются электрогенными бактериями для переноса электронов [7]. Согласно литературным данным, из 1 т биомассы можно получить 1 МВт электроэнергии в час [8], что делает биоэнергетику одной из самых быстрорастущих отраслей энергетики, позволяя получать энергию из самых различных источников.

Выбор микроорганизмов, участвующих в выработке чистой электроэнергии, играет важную роль в работе МТЭ. Он основан на природе, активности и стабильности микроорганизмов. Бактерии помещают в анодную камеру, где они осуществляют окисление органических субстратов, а в результате их метаболизма происходит генерирование электронов [9]. Инокулят, помещаемый в анодную камеру, может быть представлен как чистой культурой микроорганизмов, так и их консорциумом [10]. Чистая культура позволяет добиться интенсификации выработки экологически чистой энергии, но она не лишена недостатков. Использование монокультуры требует соблюдения более строгих условий эксплуатации, она является селективной, что обуславливает использование более узкого круга субстратов, к тому же возрастает вероятность ее загрязнения [11, 12]. Вышеперечисленные факторы осложняют применение чистых культур для крупномасштабного использования в МТЭ. Преимуществом смешанной культуры микроорганизмов выступает их способность к адаптации в изменяющихся условиях пользования [13]. Поэтому перед началом эксплуатации МТЭ необходимы исследования по подбору наиболее оптимальных параметров культивирования микроорганизмов, чтобы выяснить условия максимального генерирования биоэнергии.

В последнее время ведутся разработки по получению биоэнергии с помощью экстремофильных микроорганизмов. Под экстремофильными понимают микроорганизмы, способные

сохранять жизнедеятельность в экстремальных условиях, вызванных как физическими (давление, радиация, температура), так и геохимическими явлениями (засуха, уровень кислорода, рН, соленость и др.) [14].

Почвы угольных отвалов могут служить источником экстремофильных микроорганизмов [15], поскольку обладают высоким уровнем содержания тяжелых металлов, их значения рН варьируются от кислых до щелочных, что создает экстремальные условия для обитающих там микроорганизмов [16].

Сегодня достаточно остро стоит вопрос о загрязнении водных объектов сточными водами. Их сброс может негативно воздействовать на окружающую среду [17]. Согласно литературным данным, около 80 % сточных вод, образуемых в результате деятельности различных предприятий, попадает в водные объекты [18]. Вместе с тем сточные воды содержат перспективные субстраты для получения электроэнергии [19]. Их использование и очистка в МТЭ имеет преимущества по сравнению с широко распространенными методами, которые менее эффективны как в экономическом, так и в энергетическом плане [20].

Цель настоящего исследования – получение электроэнергии путём культивирования железобактерий, выделенных из почвы угольного отвала «Моховский» Кемеровской области с помощью МТЭ.

### Материалы и методы

Объектами исследования выбраны железобактерии, выделенные из техногенно нарушенной почвы отвала угольного разреза «Моховский» (Кемеровская область).

*Выделение культур железобактерий.* Для выделения железобактерий из почвы угольного отвала использовали метод экстракции [21]. Для этого готовили суспензию почвы в стерильной воде (1:10) и помещали в шейкер-инкубатор LSI-3016A (Daihan Labtech, Корея) (25 °С, 70 об/мин). Процесс экстракции осуществляли в течение 7 суток для активации железобактерий. Надосадочную жидкость использовали для получения серии десятикратных разведений ( $10^{-1}$ – $10^{-5}$ ). Разведения высевали на чашки Петри с агаризованными селективными питательными средами для выделения железобактерий.

Питательная среда для выделения железобактерий № 1 (г/л):  $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$  (0,5),  $\text{NaNO}_3$  (0,5),  $\text{K}_2\text{HPO}_4$  (0,5),  $\text{NaNO}_3$  (0,5),  $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$  (0,5), лимонная кислота (10,0), сахароза (2,0), триптон (1,0),  $\text{FeSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$  (5,9), агар-агар (20), рН среды – 6,8 [22];

Питательная среда для выделения железобактерий № 2 (г/л):  $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$  (0,50),  $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$  (0,50),  $\text{K}_2\text{HPO}_4$  (0,05),  $\text{KCl}$  (0,05),  $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$  (0,05),  $\text{CaCO}_3$  (0,10), глюкоза (0,15), тиамин (0,0004),  $\text{V}_{12}$  (цианокобаламин) (0,0001), агар-агар (10,00).

Культивирование проводили в течение 7 суток при 25 °С. После культивирования отбирали колонии железобактерий, пересаживали их на скошенный агар и культивировали в течение суток. Со скошенного агара пересевали бактерий на чашки Петри с МПА методом изолированных колоний. Проводили окрашивание по Граму и микроскопирование колоний на инверсионном микроскопе Axio Vert.A1 (Carl Zeiss AG, Германия).

*Подбор параметров культивирования и сборка прототипа МТЭ.* Для разработки прототипа однокамерного безмембранного МТЭ использовали пластиковую камеру объемом 1 л. В качестве электродов применяли графитовые стержни. В МТЭ была проведена серия пред-

варительных экспериментов по подбору оптимальных условий культивирования выделенных культур микроорганизмов.

Перед инокулированием культур в камеру делали серию пересевов выделенных штаммов в колбы с 50 и 250 мл МПБ для выращивания биомассы посевного материала (25 °С, 48 ч).

Для определения оптимального значения рН в камеру заливали 750 мл среды МПБ, добавляли суспензии отобранных культур в количестве 1 % от объема среды и культивировали при 25 °С в течение суток. Значения рН варьировали с помощью лимонной кислоты (1 М) и р-ра NaOH (1 М). По прошествии указанного срока проводили измерение генерируемого бактериями напряжения с помощью мультиметра DT-832 (ТЕК, Швейцария) для каждой отобранной культуры.

Определение биосовместимости выделенных культур железобактерий для создания консорциума осуществляли капельной методикой [23].

Для нахождения оптимальной температуры камеру с 750 мл МПБ с подобранным вышеуказанным способом значением рН ставили в термостат на 24 ч при различных значениях (15, 20, 25, 30, 37, 40, 45 °С). По прошествии суток проводили измерение напряжения сгенерированного тока.

При определении оптимального времени культивирования консорциум железобактерий в соотношении 1:1 и количестве 1 % от объема среды загружали в 750 мл МПБ с оптимальным значением рН и ставили в термостат при оптимальной температуре. Измерения напряжения тока осуществляли через 18, 24, 36, 48 и 72 ч.

Все измерения генерируемого напряжения проводили в режиме разомкнутой электрической цепи.

Поиск оптимального состава субстрата для генерирования биоэнергии вели на 5 синтетических сточных водах (табл. 1).

Показателем очистки сточных вод служила степень осветления выбранного оптимального состава субстрата на спектрофотометре UV 1800 (Shimadzu, Япония) при длине волны 600 нм.

## Результаты и обсуждение

При культивировании почвенной суспензии на селективных средах было выявлено изменение цвета среды № 1 (рис. 1 а) с зеленого на темно-коричневый, что может свидетельствовать об окислении ионов железа  $Fe^{2+}$  до  $Fe^{3+}$  под действием микроорганизмов. На чашках Петри с селективной средой № 2 наблюдалось образование клейкого слоя, что также можно рассматривать как указание на работу железобактерий (рис 1б).

В итоге было выделено 5 культур железоокисляющих бактерий (рис. 2).

Описание выделенных микроорганизмов представлено в табл. 2.

На рис. 3 представлена фотография прототипа однокамерного безмембранного МТЭ, используемого в эксперименте.

Согласно результатам эксперимента по подбору оптимального значения рН (рис. 4), максимальное напряжение тока наблюдалось при культивировании культур № 1 и № 2 в питательной среде со значением  $pH=3$ , что свидетельствует о том, что вышеупомянутые культуры железобактерий являются экстремофильными и растут в кислых условиях. При этом культура № 1 при вышеуказанном значении рН генерировала напряжение в 350,9 мВ, культура № 2 – в 346,8 мВ.

Таблица 1. Подбор оптимального состава субстрата для получения биоэнергии

Table 1. Selection of the optimal composition of the substrate for obtaining bioenergy

Компоненты	Содержание, г/л				
	Субстрат № 1	Субстрат № 2	Субстрат № 3	Субстрат № 4	Субстрат № 5
Глюкоза	2,000	0,050	–	–	–
Пептон	0,400	0,080	0,080	0,080	0,080
Мясной экстракт	0,250	–	–	–	–
NH <sub>4</sub> Cl	0,200	–	–	–	–
MgSO <sub>4</sub> ·7H <sub>2</sub> O	0,025	0,005	0,005	0,005	0,005
FeSO <sub>4</sub> ·7H <sub>2</sub> O	0,020	–	–	–	–
K <sub>2</sub> HPO <sub>4</sub> ·3H <sub>2</sub> O	0,045	–	–	–	–
KNO <sub>3</sub>	0,030	–	–	–	–
CaCl <sub>2</sub>	0,150	0,008	0,008	0,008	0,008
H <sub>3</sub> BO <sub>3</sub>	0,150	–	–	–	–
CuSO <sub>4</sub> ·5H <sub>2</sub> O	0,030	–	–	–	–
FeCl <sub>3</sub> ·6H <sub>2</sub> O	1,500	–	–	–	–
ZnSO <sub>4</sub> ·7H <sub>2</sub> O	0,120	–	–	–	–
KI	0,030	–	–	–	–
KH <sub>2</sub> PO <sub>4</sub> ·3H <sub>2</sub> O	–	0,025	0,025	0,025	0,025
NaCO <sub>3</sub>	–	0,050	0,050	0,050	0,050
(NH <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> HPO <sub>4</sub>	–	0,025	0,025	0,025	0,025
Сахароза	–	–	0,050	–	–
CH <sub>3</sub> COONa	–	–	–	0,050	–
ПАВ	–	–	–	–	0,050



а)



б)

Рис. 1. Выделение железобактерий из почвы угольного отвала разреза «Моховский»: а) разведение почвенной суспензии 10<sup>-1</sup> на селективной среде № 1, б) разведение почвенной суспензии 10<sup>-1</sup> на селективной среде № 2Fig. 1. Isolation of iron bacteria from the soil of the coal dump of the Mokhovskiy section: a) dilution of soil suspension 10<sup>-1</sup> on selective medium № 1, b) dilution of soil suspension 10<sup>-1</sup> on medium 2

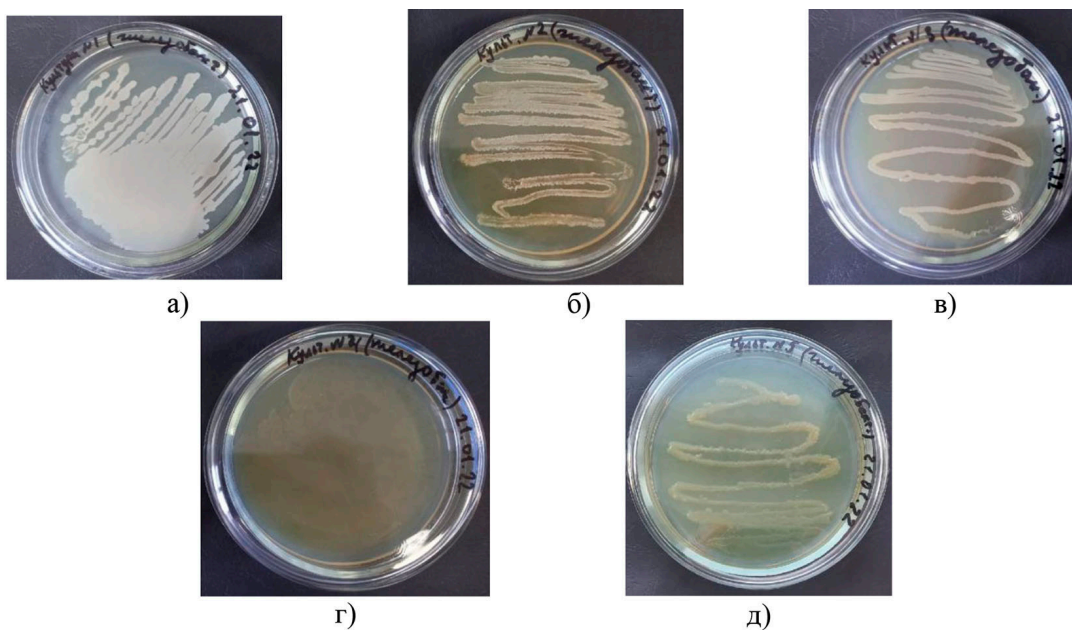


Рис. 2. Рост выделенных культур железобактерий на МПА: а) культура № 1, б) культура № 2, в) культура № 3, г) культура № 4, д) культура № 5

Fig. 2. Growth of isolated cultures of iron bacteria by MPA: a) culture 1, b) culture 2, c) culture 3, d) culture 4, e) culture 5

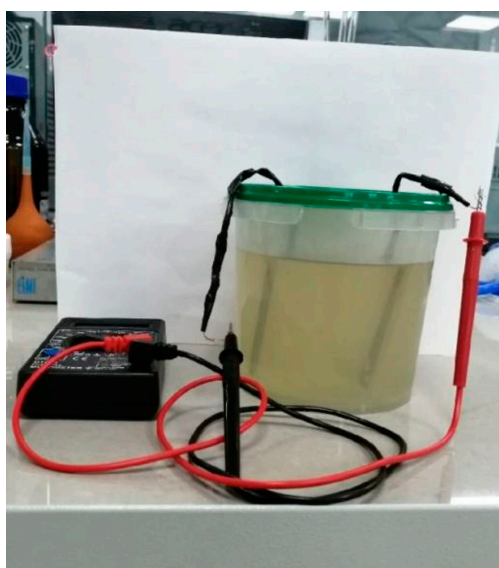
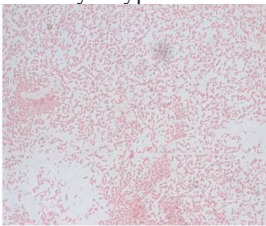
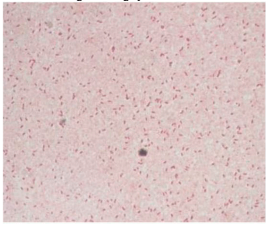

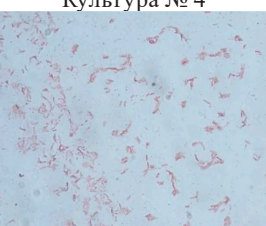
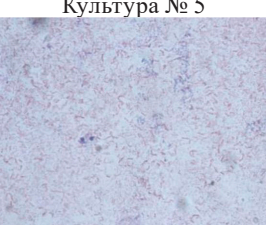


Рис. 3. Конструкция однокамерного безмембранного МТЭ

Fig. 3. The design of a single-chamber membrane-free MFC

Таблица 2. Морфологические свойства выделенных микроорганизмов

Table 2. Morphological properties of isolated microorganisms

Микроскопическая картина	Морфологическое описание
<p data-bbox="348 333 494 359">Культура № 1</p> 	<p data-bbox="701 359 1115 386">Грамотрицательные бактерии, палочки</p> <p data-bbox="701 390 911 416">Размер: 0,6–0,7 мкм</p> <p data-bbox="701 421 882 447">Диаметр: 0,3–0,4</p> <p data-bbox="701 451 1022 478">Форма колоний: неправильная</p> <p data-bbox="701 482 1062 508">Размер колоний: средний (2–4 мм)</p> <p data-bbox="701 513 1186 539">Цвет колоний: белый, матовый, непрозрачные</p> <p data-bbox="701 543 972 570">Края колоний: волнистые</p>
<p data-bbox="348 592 494 619">Культура № 2</p> 	<p data-bbox="701 697 1230 752">Консорциум, состоящий из грамотрицательных хорошо окрашенных и плохо окрашенных палочек</p>
<p data-bbox="348 852 494 878">Культура № 3</p> 	<p data-bbox="701 887 1122 913">Грамположительные бактерии, палочки</p> <p data-bbox="701 917 911 944">Размер: 0,9–2,2 мкм</p> <p data-bbox="701 948 929 974">Диаметр: 0,3–0,4 мкм</p> <p data-bbox="701 979 958 1005">Форма колоний: круглая</p> <p data-bbox="701 1009 1090 1064">Цвет колоний: кремовый, блестящие, непрозрачные</p> <p data-bbox="701 1069 972 1095">Края колоний: волнистые</p>
<p data-bbox="348 1111 494 1138">Культура № 4</p> 	<p data-bbox="701 1181 851 1208">Стрептококки</p> <p data-bbox="701 1212 929 1238">Диаметр: 0,1–0,3 мкм</p> <p data-bbox="701 1242 865 1269">Сплошной рост</p> <p data-bbox="701 1273 1001 1299">Цвет: тусклый, прозрачный;</p> <p data-bbox="701 1304 972 1330">Края колоний: волнистые</p>
<p data-bbox="348 1373 494 1400">Культура № 5</p> 	<p data-bbox="701 1422 851 1449">Стрептококки</p> <p data-bbox="701 1453 879 1479">Диаметр: 0,3–0,4</p> <p data-bbox="701 1483 958 1510">Форма колоний: круглая</p> <p data-bbox="701 1514 1150 1569">Цвет колоний: бледно-желтый, блестящие, тусклые</p> <p data-bbox="701 1573 972 1600">Края колоний: волнистые</p> <p data-bbox="701 1604 901 1631">Рельеф: выпуклый</p>



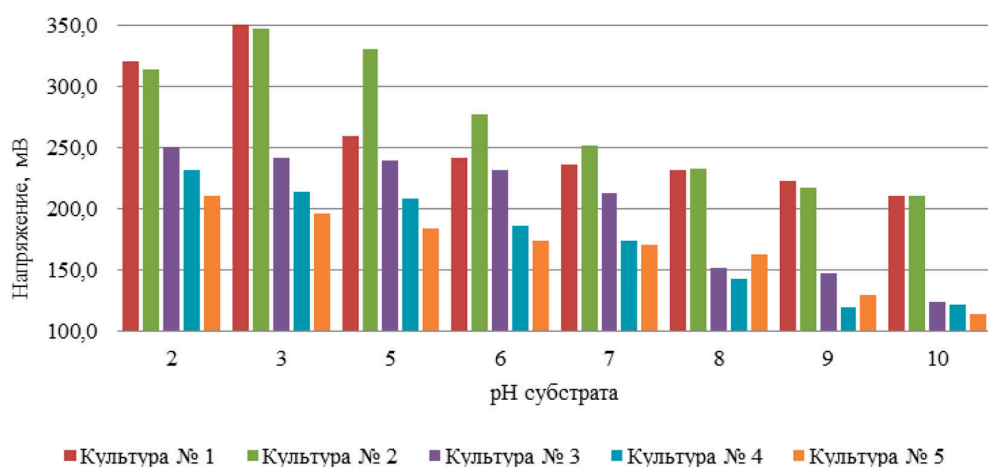


Рис. 4. Подбор оптимального значения pH питательной среды для железобактерий в МТЭ

Fig. 4. Selection of the optimal pH value of the nutrient medium for iron bacteria in MFC



Рис. 5. Исследование биосовместимости экстремофильных культур железобактерий, используемых в МТЭ

Fig. 5. Investigation of the biocompatibility of extremophilic cultures of iron bacteria used in MFC

Отобранные таким образом штаммы железобактерий при исследовании на биосовместимость оказались полностью биосовместимыми, что позволило в дальнейшем использовать их для создания консорциума (рис. 5).

Исследование на подбор оптимальной температуры проведения эксперимента позволило установить, что наибольшее напряжение (256,1 мВ) зарегистрировано при температуре 37 °С (рис. 6).

При исследовании консорциума на оптимальное время культивирования установлено, что максимальное напряжение наблюдалось при 48 ч. работы МТЭ (рис. 7). Напряжение, генерируемое консорциумом микроорганизмов, составило 212,3 мВ.

При подборе субстрата установлено, что наиболее оптимальной средой для культивирования экстремофильных микроорганизмов, продуцирующих биоэнергию, является субстрат № 1,

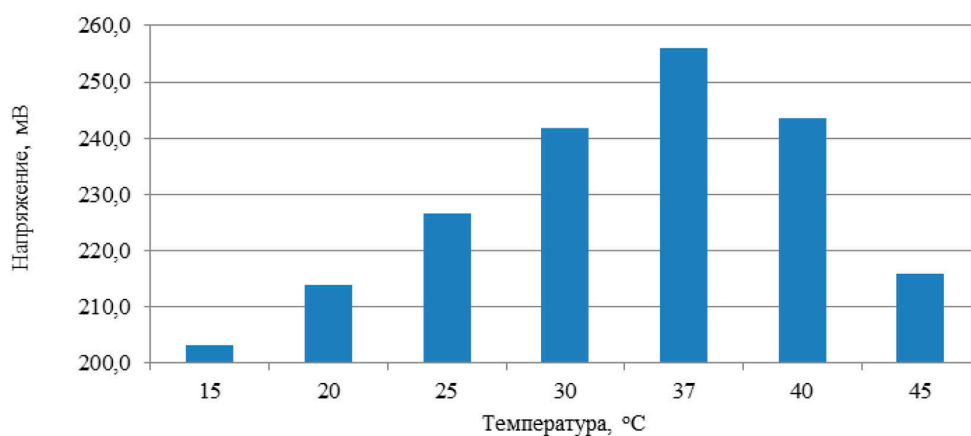


Рис. 6. Подбор оптимального значения температуры культивирования консорциума железобактерий (культур № 1 и № 2), используемых в МТЭ

Fig. 6. Selection of the optimal value of the cultivation temperature of the consortium of iron bacteria (cultures 1 and 2) used in MFC

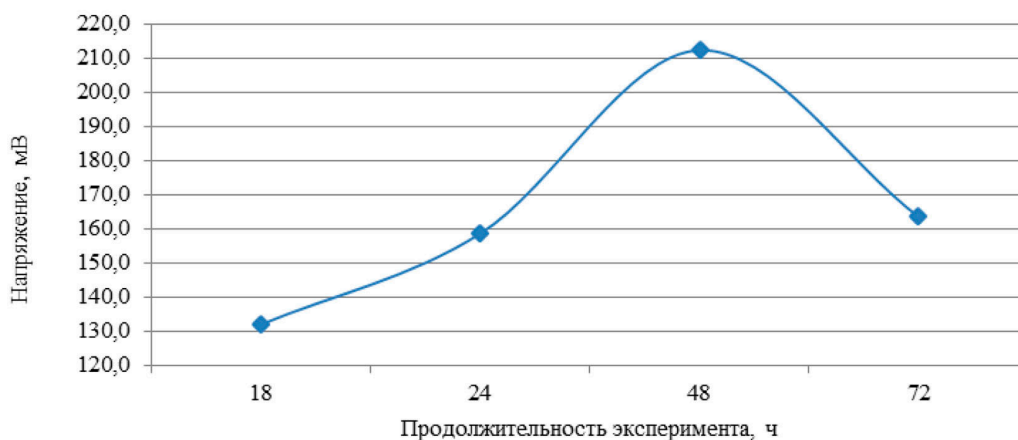


Рис. 7. Подбор оптимального значения продолжительности культивирования консорциума железобактерий (культур № 1 и № 2), используемых в МТЭ

Fig. 7. Selection of the optimal value of the duration of cultivation of the consortium of iron bacteria (cultures 1 and 2) used in MFC

который содержит в своем составе глюкозу в качестве источника углерода и энергии и сульфат железа (II) в качестве медиатора для накопления электронов железобактериями (рис. 8). Напряжение, генерируемое консорциумом железобактерий, помещенных в камеру с субстратом № 1, составило 403,4 мВ при оптимальном времени проведения эксперимента 48 ч. При этом напряжение, генерируемое бактериями на других субстратах, имело значение почти в 4 раза меньше – на субстрате № 2–103,5 мВ, на субстрате № 3–110,2 мВ, на субстрате № 4–123,7 мВ, на субстрате № 5–60,1 мВ.

После выбора оптимального состава субстрата для получения экологически чистой энергии проводили изучение степени очистки данного субстрата. В результате зафиксировано, что до начала эксперимента субстрат имел оптическую плотность 0,234, а в конце эксперимента –

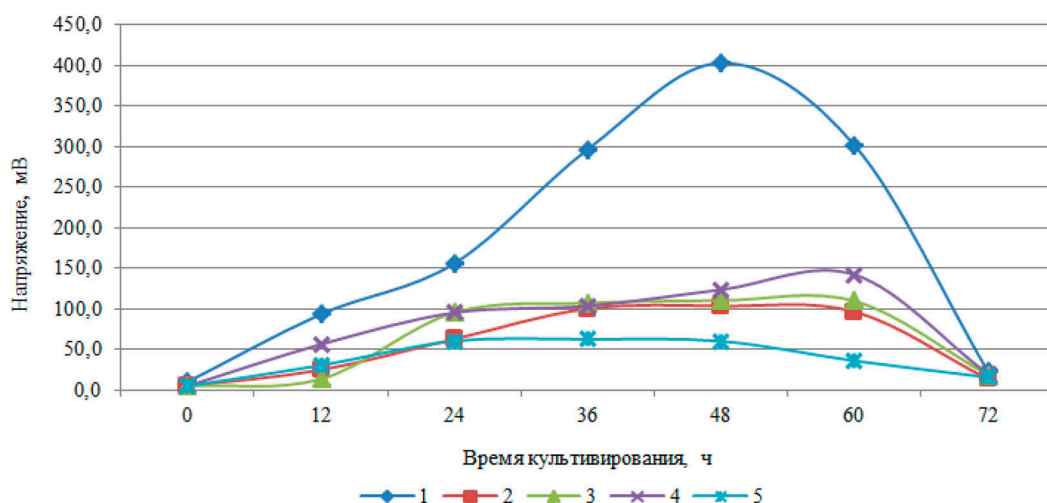


Рис. 8. Подбор оптимального состава субстрата для консорциума железобактерий для работы в МТЭ: 1 – субстрат № 1, 2 – субстрат № 2, 3 – субстрат № 3, 4 – субстрат № 4, 5 – субстрат № 5

Fig. 8. Selection of the optimal composition of the substrate for the consortium of iron bacteria to work in MFC: 1 – substrate 1, 2 – substrate 2, 3 – substrate 3, 4 – substrate 4, 5 – substrate 5

0,053. Также наблюдалось выпадение осадка на дно камеры после окончания эксперимента, что может свидетельствовать об удалении субстрата.

### Заключение

В результате проведения эксперимента выделены культуры железобактерий из почвы угольного отвала «Моховский», среди которых отобраны экстремофильные микроорганизмы, растущие и генерирующие биоэнергию при значении pH=3. Проведен ряд исследований по подбору наиболее оптимальных условий эксплуатации МТЭ. Установлено, что оптимальной температурой для культивирования и продуцирования энергии бактериями является 37 °С (напряжение при этом составило 256,1 мВ). Оптимальное время проведения эксперимента – 48 ч., при этом железобактерии продуцировали ток напряжением 212,3 мВ. При подборе оптимального состава субстрата выяснено, что наибольшее напряжение генерировали бактерии на субстрате № 1, содержащем в своем составе глюкозу и сульфат железа (II). Бактерии, культивируемые на этом субстрате, продуцировали напряжение 403,4 мВ. Методом спектрофотометрии подтверждено, что железобактерии также способствуют очистке модельных сточных вод путем осветления субстрата и образования осадка по окончании эксперимента.

### Список литературы / References

- [1] The main indicators of environmental protection. *Statistical Bulletin*, 2021, 110.
- [2] Нездоровая атмосфера: 2020 год установил шестнадцатилетний рекорд по загрязнениям воздуха [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://finexpertiza.ru/press-service/researches/2022/rekord-vysok-zagr-vozd/> [Нездоровая атмосфера: 2020 год установил шестнадцатилетний рекорд по загрязнению воздуха [Electronic resource] – Access: <https://finexpertiza.ru/press-service/researches/2022/rekord-vysok-zagr-vozd/>]

[3] Shulga R.N., Putilova I. V. Multi-agent direct current systems using renewable energy sources and hydrogen fuel cell. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2020, 45(11), 6982–6993.

[4] Choudhury P., Prasad Uday U. S., Bandyopadhyay T.K., Ray R. N., Bhunia B. Performance improvement of microbial fuel cell (MFC) using suitable electrode and Bioengineered organisms: A review. *Bioengineered*, 2017, 8(5), 471–487.

[5] Bose D., Dey A., Banerjee T. Aspects of bioeconomy and microbial fuel cell technologies for sustainable development. *Sustainability: The Journal of Record*, 2020, 13(3), 107–118.

[6] Bose D., Dhawan H., Kandpal V., Vijay P., Gopinath, M. Sustainable power generation from sewage and energy recovery from wastewater with variable resistance using Microbial Fuel Cell. *Enzyme microb. tech.*, 2018, 1(18), 92–101.

[7] Kim K.Y., Yang W., Evans P. J., Logan B. E. Continuous treatment of high strength wastewaters using air-cathode microbial fuel cells. *Bioresource technol.*, 2016, 221, 96–101.

[8] Mandley S.J., Daioglou V., Junginger H.M., van Vuuren D.P., Wicke B. EU bioenergy development to 2050. *Renewable and sustainable energy reviews*. 2020, 127, 109858.

[9] Jadhav D.A., Mungray A.K., Arkatkar A., Kumar S.S. Recent advancement in scaling-up applications of microbial fuel cells: from reality to practicability. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 2021, 45, 101226.

[10] Pandit S., Savla N., Sonawane J. M., Sani A. M., Gupta P. K., Mathuriya A. S., et al. Agricultural waste and wastewater as feedstock for bioelectricity generation using microbial fuel cells: recent advances. *Fermentation*, 2021, 7(3), 169. <https://doi.org/10.3390/fermentation7030169>

[11] Moradian J. M., Fang Z., Yong Y. C. Recent advances on biomass-fueled microbial fuel cell. *Bioresources and bioprocessing*, 2021, 8(1), 1–13.

[12] Cao Y., Mu H., Liu W., Zhang R., Guo J., Xian M., et al. Electricigens in the anode of microbial fuel cells: pure cultures versus mixed communities. *Microb cell fact*, 2019, 18(1), 1–14.

[13] Breheny M., Bowman K., Farahmand N., Gomaa O., Keshavarz T., Kyazze, G. Biocatalytic electrode improvement strategies in microbial fuel cell systems. *J. Chem. Technol. Biot.*, 2019, 94(7), 2081–2091.

[14] Shrestha N., Chilkoor G., Vemuri B., Rathinam N., Sani R. K., Gadhamshetty V. Extremophiles for microbial-electrochemistry applications: a critical review. *Bioresource technol.*, 2018, 255, 318–330.

[15] Kaczorek E., Smulek W. Special Issue «Study of Biodegradation and Bioremediation». *Processes*, 2021, 9(7), 1130.

[16] Nádudvari Á., Kozielska B., Abramowicz A., Fabiańska M., Ciesielczuk J., Cabała, J., et al. Heavy metal-and organic-matter pollution due to self-heating coal-waste dumps in the Upper Silesian Coal Basin (Poland). *J. Hazard. Mater.*, 2021, 412, 125244.

[17] Мизанбекова С.К. Инновационные технологии очистки сточных вод для ресурсосберегающей деятельности комбикормовых предприятий [Mizanbekova S.K., Bogomolova I.P., Vasilenko I.N., Urazova O.A. Innovative Wastewater Treatment Technologies for Resource-Saving Activities of Feed Mills. *Food Processing: Techniques and Technology*, 2021, 51(4), 743–752. (In Russian)].

[18] Kumar S.S., Kumar V., Malyan S.K., Sharma J., Mathimani T., Maskarenj M.S. et al. Microbial fuel cells (MFCs) for bioelectrochemical treatment of different wastewater streams. *Fuel*, 2019, 254, 115526.

[19] Singh H. M., Pathak A. K., Chopra K., Tyagi V. V., Anand S., Kothari R. Microbial fuel cells: a sustainable solution for bioelectricity generation and wastewater treatment. *Biofuels*, 2019, 10(1), 11–31.

[20] Elhenawy S., Khraisheh M., AlMomani F., Al-Ghouti M., Hassan M. K. From Waste to Watts: Updates on Key Applications of Microbial Fuel Cells in Wastewater Treatment and Energy Production. *Sustainability*, 2022, 14(2), 955.

[21] Гхорбанзадех Н., Лакзиан А., Хагхния Г.Х., Карими А.Р. Выделение и идентификация железовосстанавливающих бактерий и оценка их роли в доступности железа в карбонатных почвах, *Почвоведение*, 2014, 12, 1490 [Ghorbanzadeh N., Lakzian A., Haghnia G. H., Karimi A. R. Isolation and identification of ferric reducing bacteria and evaluation of their roles in iron availability in two calcareous soils. *Pochvovedenie*, 2014, 12, 1490. (In Russ.)]

[22] Федорюк Е.Д., Няникова Г.Г. Выделение культур железо- и марганцеоксилирующих микроорганизмов. *Наука и образование в современной конкурентной среде*, 2015, 1(2), 3–8 [Fedoryuk E. D., Nyanikova G. G. Isolation of cultures of iron- and manganese-oxidizing microorganisms. *Science and education in the modern competitive environment*, 2015, 1(2), 3–8 (In Russian)]

[23] Волкова Г.С., Куксова Е.В., Серба Е.М. Изучение биологических межштаммовых взаимодействий и ростовых свойств производственных штаммов молочнокислых бактерий. *Актуальные вопросы молочной промышленности, межотраслевые технологии и системы управления качеством*, 2020, 1(1), 104–109. [Volkova G. S., Kuksova E. V., Serba E. M. Study of biological inter-strain interactions of probiotic bacteria for the production of a combined starter culture. *Topical issues of the dairy industry, intersectoral technologies and quality management systems*. 2020, 1(1), 104–109. (In Russian)]