

06

Свойства биоэлектрохимических систем на основе электрогенных процессов в корнеобитаемой среде салата при их масштабировании

© Т.Э. Кулешова, Е.М. Эзерина, В.Е. Вертебный, Ю.В. Хомяков, Г.Г. Панова

Агрофизический научно-исследовательский институт,
195220 Санкт-Петербург, Россия
e-mail: www.piter.ru@bk.ru

Поступило в Редакцию 29 февраля 2024 г.
В окончательной редакции 11 июля 2024 г.
Принято к публикации 17 июля 2024 г.

Представлено исследование свойств биоэлектрохимических систем при их масштабировании путем последовательного соединения ячеек. В качестве растительного объекта выбран салат сорта Тайфун, а технологии культивирования — панопоника. Полученное среднее напряжение одной ячейки составило 102 мВ, трех и двадцати последовательно соединенных ячеек — 197 и 1782 мВ соответственно, что ниже ожидаемых значений на 36 и 13%. Анализ разности потенциалов, создаваемой в каждой ячейке в цепи из нескольких последовательно соединенных биоэлектрохимических систем, показал существенную неравномерность показателей и даже наличие отрицательной полярности. Снижение суммарной мощности при создании батарей из биоэлектрохимических систем отмечено многими исследователями и связывается с неоднородностью элементов, входящих в цепь, и наличием реверсивных напряжений. Наиболее эффективный путь увеличения мощностных характеристик биоэлектрохимических систем заключается в аккумулировании получаемой биоэнергии с использованием ионисторов.

Ключевые слова: растительно-микробный топливный элемент, последовательное соединение, зеленая энергия, панопоника, ионисторы.

DOI: 10.61011/JTF.2024.09.58678.65-24

Введение

В настоящее время остро стоит проблема истощения основных видов ресурсов — энергетических и продовольственных. Возобновляемая энергия рассматривается как один из способов облегчения топливных потребностей будущего, преодоления кризиса глобального потепления и снижения выбросов углекислого газа, а использование гибридных источников энергии совмещенного назначения позволяет эффективно сочетать производственные процессы.

Актуальным направлением альтернативной энергетики выступает развитие природных энергоресурсов, к которым относятся биоэлектрохимические системы (БЭС) — устройства для получения электрической энергии за счет протекания химических реакций, сопутствующих жизнедеятельности живых организмов. БЭС могут включать такие биологические системы, как микроорганизмы [1], водоросли [2], растения [3] и их комбинации.

Принцип работы классической БЭС — микробного топливного элемента (МТЭ) заключается в окислении органических соединений (ацетат, глюкоза, целлюлоза, компоненты сточных вод) экзоэлектрогенными бактериями с образованием электронов, протонов и углекислого газа [4]. Для разделения зарядов в МТЭ используются различные конструкции, включая как стандартную схему двухкамерного топливного элемента, состоящую из анодного сектора с микроорганизмами и катодного отсека с водой, разделенных протонообменной мембраной

[1], так и различные модификации — более простые однокамерные устройства [5], легко интегрируемые модели в виде трубки [6] и снижающее внутреннее сопротивление устройства безмембранного типа [7].

Доступность применения технологии МТЭ была расширена за счет использования в качестве субстрата для микроорганизмов органических веществ, синтезируемых растениями в ходе фотосинтетических реакций и частично выделяемых в корнеобитаемую среду в виде ризодепозитов [3]. Такая БЭС, названная „растительно-микробный топливный элемент“ (РМТЭ), может быть источником долгосрочного и устойчивого производства возобновляемой и экологически чистой биоэнергии, так как генерируемая на всем протяжении вегетационного периода электроэнергия не требует дополнительного внешнего ввода субстрата для поддержания жизнедеятельности электроактивных микроорганизмов [8]. РМТЭ работают наподобие солнечных фотоэлектрических элементов, генерируя электроэнергию в процессе фотосинтетических реакций с образованием органических соединений, химическая энергия которых преобразуется микроорганизмами в электрическую. БЭС на основе электроактивных растительно-микробных взаимодействий является перспективным биоэнергетическим ресурсом, поскольку позволяет сочетать производство электроэнергии и растительной продукции, при этом не конкурируя за сельскохозяйственные территории [9].

Слабой стороной электрохимических систем, основанных на биоэлектрогенезе, являются низкие выходные

электрические параметры. В качестве одного из главных недостатков БЭС выступает высокое и различающееся для одиночных ячеек внутреннее сопротивление, вследствие чего получаемая с помощью живых организмов энергия может рассматриваться только как источник питания маломощных устройств [10]. Кроме того, на выход электроэнергии влияют омические потери, потери при активации, метаболические процессы и концентрационные эффекты [11]. Снижение омических потерь, вызванных высоким внутренним сопротивлением системы, возможно путем уменьшения расстояния между электродами или удаления ионоселективной мембраны [12], однако при этом в условиях близкого расположения электродов могут снижаться концентрационные эффекты распределения ионов и возникать контаминация катода микроорганизмами, что, в свою очередь, ведет к уменьшению выходной мощности БЭС [10].

Повышение выходной мощности за счет увеличения размеров анодной камеры также не приводит к желаемому пропорциональному росту выходных электрических характеристик [13]. Наоборот, в некоторых случаях отмечается уменьшение удельной мощности с 420 до 89 мВт/м² при изменении объема от 4 до 20 мл [14], и отсутствие пропорционального увеличения мощности при расширении объема с 100 мл до 5 л [15]. Удваивание размера катода приводило к повышению мощности лишь на 62%, а анода — лишь на 12% при использовании бытовых сточных вод в МТЭ [16]. Было показано, что увеличение объема до величины, превышающей 2000 мл, приводит к росту активности метаногенных бактерий, которые конкурируют с электрогенными микроорганизмами, снижая их активность [13,17].

Другим возможным путем увеличения мощностных характеристик БЭС является масштабирование — электрическое соединение в батарею нескольких одиночных ячеек. Однако по результатам масштабирования РМТЭ с зеленой фасолью было показано, что слишком большое количество соединенных последовательно ячеек приводит к потерям напряжения из-за возможности возникновения реверсивного напряжения [18]. Получаемая мощность от одной, трех и девяти последовательно соединенных ячеек с площадью анода 25,8, 77,4 и 232,2 см² составила 0,39, 1,00 и 1,37 мВт соответственно [18].

В целом отмечается, что комбинирование параллельного и последовательного соединения ячеек при их масштабировании существенно влияет на выходные характеристики батарей из РМТЭ [18]. При создании комплексных электрических схем оптимальным было последовательное подключение не более трех ячеек БЭС — например, параллельное соединение трех элементов из трех последовательно соединенных РМТЭ привело к увеличению удельной мощности до 161 мВт/м², что соответствовало возрастанию выходных характеристик единичной ячейки в 9,7 раз и было наибольшей величиной из исследованных вариантов для растений фасоли [18].

К настоящему времени проблема с компоновкой и масштабированием БЭС становится все более очевид-

ной, так как при создании батарей ожидаемого суммирования мощностей, получаемых с одного элемента, как для классических гальванических элементов, не происходит. Изменение параметров одиночной ячейки, которые, в первую очередь, связаны с состоянием растений и окружающих их микроорганизмов, влечет за собой снижение общего напряжения в батарее БЭС [19]. Кроме того, наибольшую проблему создают наблюдаемые изменения в полярности входящих в цепь элементов, что ведет к перезарядке ячейки от стабильно работающих систем и возможным изменениям внутреннего импеданса [20]. В связи с этим актуальными и содержащими новизну явились бы исследования параметров растительных биоэнергетических устройств при их соединении в батареи.

Цель настоящей работы заключалась в изучении свойств электрических цепей из БЭС на основе электрогенных процессов корнеобитаемой среды растений и поиске эффективных путей масштабирования биоэнергетических устройств.

1. Конструкция БЭС

В качестве фитотест-объекта был выбран листовой салат (*Lactuca sativa* L.) сорта Тайфун производства ООО „Сортсеменовощ“ (Россия), имеющий развитую корневую систему стержневого типа с множеством боковых ответвлений. Среди широкого разнообразия сортоформ листовой салат Тайфун обладает богатым витаминно-минеральным составом и характеризуется быстрым ростом, крупной открытой розеткой листьев и способностью давать стабильный урожай.

Для изучения электрических явлений, возникающих в корнеобитаемой среде, лучшим объектом являются искусственные среды на основе питательных растворов за счет меньшего количества влияющих внешних факторов, в первую очередь — влажности, и большей управляемости параметрами и составом среды обитания. В связи с этим растения выращивали по технологии тонкослойной панопоники [21] в контролируемых условиях интенсивной светокультуры на агробиополигоне ФГБНУ АФИ в вегетационной установке с лампами ДНаЗ-400 в качестве источников света. Облученность составляла 75 ± 5 Вт/м² в области фотосинтетически активной радиации (ФАР), световой период — 14 часов в сутки, температура воздуха +20–22°C днем и +18–20°C ночью, относительная влажность воздуха — 65–70%. В качестве питательного раствора использовали раствор Кнопа, содержащий $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2 \times 4\text{H}_2\text{O}$, KNO_3 , KCl , KH_2PO_4 , $\text{MgSO}_4 \times 7\text{H}_2\text{O}$ и микроэлементы [22].

Экспериментальная БЭС представляла собой ячейку площадью 187 × 137 мм и высотой 72 мм, в которой размещали и выращивали пророщенные семена салата (рис. 1). Измеряемой характеристикой, отражающей биоэлектрическую активность корневой системы и сопутствующих микроорганизмов и протекание метабо-

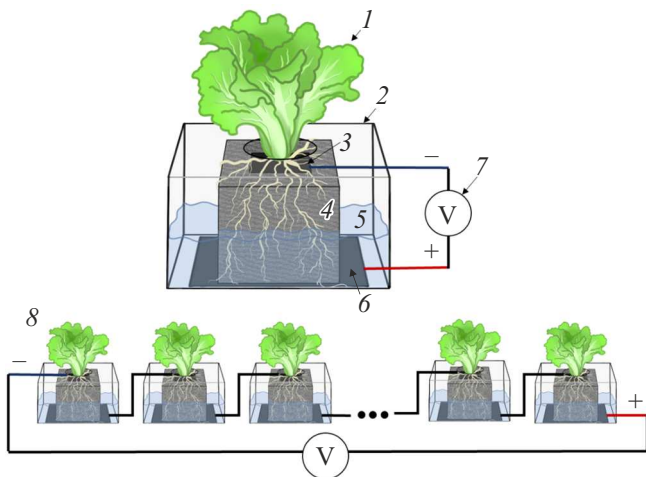


Рис. 1. Схематичное изображение экспериментальной БЭС, включающей: 1 — растительный объект, 2 — емкость для выращивания, 3 — верхний электрод, 4 — платформу для растений, покрытую гидрофильным материалом, 5 — питательный раствор, 6 — нижний электрод, 7 — вольтметр, 8 — последовательное соединение ячеек БЭС в электрическую цепь из n элементов.

лических процессов в корнеобитаемой среде, служила разность потенциалов, измеряемая в нашем случае между корневой шейкой и дном емкости для выращивания. Для регистрации напряжения, формируемого в корнеобитаемой среде, в системы для культивирования устанавливали коррозионностойкие биосовместимые электроды из графитового войлока толщиной 5 мм с большой удельной поверхностью, обеспечивающие поверхностный электрический контакт с корневой системой. Нижний электрод размером 50×70 мм располагался на дне емкости для выращивания (растительни), верхний электрод площадью 50×30 мм размещали на платформе, покрытой влагонепроводящим элементом, обеспечивающим растения питание за счет капиллярного эффекта. Расстояние между электродами составляло 50 мм, количество раствора Кнопа поддерживали постоянным на уровне 25 мм. В большинстве случаев верхний электрод заряжен электроотрицательно по отношению к нижнему электроду.

С целью увеличения мощностных характеристик БЭС масштабирование осуществляли путем последовательного соединения ячеек, обеспечивая контакт нижнего электрода одного элемента с верхним электродом другого с помощью выводных проводов из нержавеющей стали. Измерение водородного показателя pH в приэлектродных областях проводили с помощью pH-метра ST20 (ОНАУС, Китай) в водных вытяжках 1:50. Мониторинг изменения разности потенциалов в корнеобитаемой среде осуществляли путем регистрации на автоматизированном вольтметре, реализованном на аппаратной платформе Arduino, каждые 15 мин в течение всего вегетационного периода [23]. Усреднение полу-

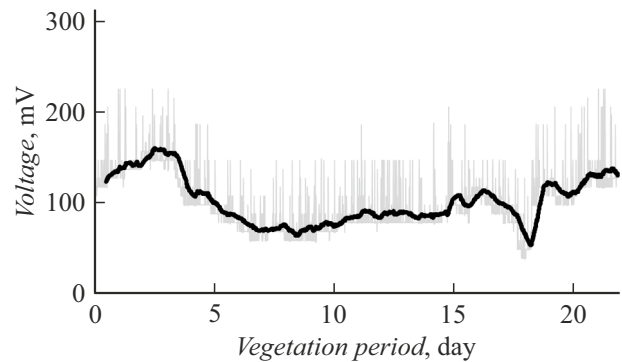


Рис. 2. Динамика формирования разности потенциалов в одной ячейке БЭС при выращивании растения салата.

ченных экспериментальных кривых проводили методом скользящего среднего с периодичностью 100 точек.

2. Характеристики одной ячейки БЭС

Динамика разности потенциалов, генерируемой в корнеобитаемой среде одиночной ячейки БЭС в процессе развития растения салата сорта Тайфун, представлена на рис. 2. Значения pH-раствора на протяжении эксперимента находились в пределах 6.2–6.4. В первые три дня вегетации наблюдаемое напряжение в системе составляло в среднем 142 ± 20 мВ. Затем с третьих по пятые сутки оно плавно спадало и стабилизировалось на уровне 82 ± 21 мВ в течение 10 дней. С пятнадцатого дня наблюдался небольшой рост разности потенциалов до 108 ± 29 мВ. В целом за весь вегетационный период среднее значение напряжения составило 102 ± 32 мВ. Можно предположить, что рост показателей начиная с пятнадцатых суток развития салата связан с формированием устойчивой биопленки и за счет этого повышением электроактивности микроорганизмов. Полученная масса салата после его культивирования в БЭС составила 56 ± 8 г, высота растения — 17 ± 2 см.

В ячейке без растений также наблюдается наличие некоторой разности потенциалов, связанной с тем, что электрохимическая система работает как концентрационный гальванический элемент, в котором питательный раствор выступает аналогом электролита [24], однако со временем разница концентраций на электродах выравнивается и напряжение падает до нуля. Ранее нами было показано, что корневая система растений играет роль ЭДС в БЭС, усиливая диффузионные процессы и транспорт ионов в процессе своей жизнедеятельности [25].

3. Последовательное соединение трех БЭС

Согласно теории электрических цепей, ожидается, что при последовательном соединении нескольких элементов напряжение системы будет пропорционально числу

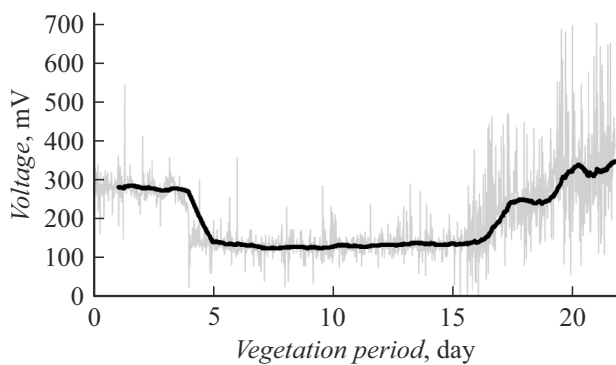


Рис. 3. Динамика формирования разности потенциалов в трех ячейках БЭС, соединенных последовательно, при выращивании растений салата.

ячеек, входящих в нее. Так, для батареи из трех ячеек ожидаемое увеличение напряжения составляет 3 раза. Однако экспериментальные данные показывают, что выходные характеристики получаются ниже предполагаемых.

На рис. 3 отражена динамика формирования разности потенциалов в трех последовательно соединенных ячейках БЭС. В целом в цепи из трех ячеек изменение напряжения было схожим с таковым в одиночной ячейке. В первые три дня наблюдалась генерация разности потенциалов в корнеобитаемой среде на уровне 276 ± 30 mV. Затем значения спадали до 130 ± 24 mV к пятым суткам вегетационного периода и были стационарны на этом уровне до пятнадцатого дня развития салата. После этого наблюдалось повышение величины напряжения до 350 mV. Среднее значение разности потенциалов на протяжении всего вегетационного периода было 197 mV. Для первой, второй и третьей ячеек средняя масса растений салата составила 46 ± 7 , 73 ± 13 , 67 ± 11 г, и высота 18 ± 2 , 21 ± 3 , 17 ± 3 см соответственно.

Таким образом, полученное увеличение напряжения при последовательном соединении трех ячеек составило 1.9 раз в первые три дня вегетации, 1.6 раз на пятый-пятнадцатый дни развития и 2.4 раза после пятнадцатых суток. Полученные данные согласуются с результатами других исследований. Например, при использовании в БЭС зеленой фасоли среднее напряжение трех последовательно соединенных РМТЭ было также только в 2.4 раза больше напряжения одиночной ячейки [18].

4. Последовательное соединение двадцати БЭС

Тот же эффект снижения суммарного напряжения при создании цепей из БЭС наблюдается и при соединении большего количества ячеек. На рис. 4 представлена измеренная динамика разности потенциалов, создаваемой при выращивании салата в двадцати последовательно со-

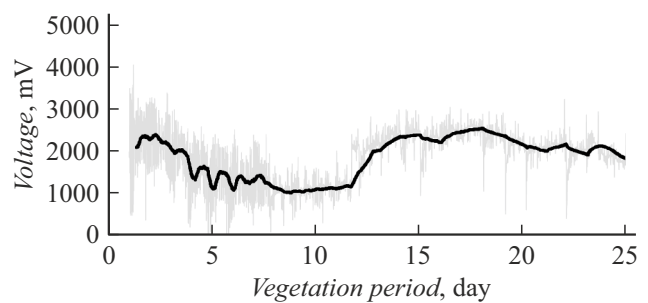


Рис. 4. Динамика формирования разности потенциалов в двадцати последовательно соединенных ячейках БЭС при выращивании растений салата.

единенных БЭС. В первые три дня генерируемое напряжение находится на уровне 2057 ± 101 mV. Затем разность потенциалов в корнеобитаемой среде, так же как и в случае с одиночной ячейкой, падает до 1281 ± 171 mV и остается стационарной в течение порядка 10 дней. На четырнадцатые-пятнадцатые сутки напряжение снова возрастает до 2306 ± 200 mV. Значение разности потенциалов для цепи из двадцати БЭС в среднем было около 1782 mV, что ниже ожидаемых 2040 mV на 13%.

Получено, что в первые дни удалось достичь повышения напряжения при последовательном соединении двадцати ячеек лишь в 14 раз. Затем с пятого по двенадцатый дни это увеличение составило 16 раз, и только после пятнадцатого дня вегетационного периода рост напряжения был пропорционален количеству входящих в цепь ячеек.

Схожие результаты наблюдались и для двадцати ячеек МТЭ, последовательно и параллельно соединенных в электрическую цепь — такая батарея БЭС могла генерировать 2.3 V и 0.5 mA [26].

5. Свойства ячеек БЭС при их последовательном соединении

Исходя из полученных данных, видно, что ожидаемого согласно второму закону напряжений Кирхгофа суммирования выходных характеристик, измеренных для одиночных ячеек БЭС, не происходит. Был проведен анализ разности потенциалов, создаваемой в каждой ячейке в цепи из нескольких последовательно соединенных БЭС (рис. 5), который показал существенную неравномерность между показателями и даже наличие отрицательной полярности.

Максимально полученное напряжение — 173 ± 23 mV — было характерно для ячейки № 14, а минимальные величины — 18 ± 13 и 21 ± 13 mV — для ячеек № 3 и 20 соответственно (см. таблицу). Интересно отметить, что отрицательная полярность и реверсивное напряжение наблюдались для БЭС, расположенных посередине электрической цепи из двадцати элементов: -33 ± 8 mV в ячейке № 11 и -62 ± 18 mV в ячейке



Рис. 5. Общий вид и нумерация двадцати последовательно соединенных БЭС при выращивании салата сорта Тайфун в конце вегетационного периода.

№ 13. При этом они находились между БЭС с самыми большими показателями разности потенциалов — $128 \pm 13 \text{ mV}$ для ячейки № 10, $151 \pm 27 \text{ mV}$ для ячейки № 12 и $173 \pm 23 \text{ mV}$ для ячейки № 14.

Вероятно, такие различия в генерируемых параметрах ячеек при их последовательном соединении и в результате пониженные выходные характеристики масштабированных БЭС связаны как с влиянием на физиологическое состояние растительных организмов — протекание тока через соединенные ячейки влияет на электрогенные свойства системы — так и с неравномерностью зарядки при неоднородных элементах, входящих в батарею — при включении в цепь более емкие элементы недоразряжаются, а менее емкие переразряжаются.

Ярко выраженной взаимосвязи между морфофизиологическими и электрическими параметрами корнеобитаемой среды найдено не было. Отмечается лишь слабая отрицательная корреляция средней разности потенциалов с массой растений (коэффициент корреляции $r = -0.17$) и умеренная отрицательная связь с высотой салатов ($r = -0.44$) в конце вегетационного периода на стадии технической зрелости салата.

Практически во всех ячейках рН верхнего электрода был больше, чем нижнего. Это соответствует наблюдаемой в большинстве случаев полярности — верхний электрод электроотрицателен и имеет более щелочной рН и меньшую активность катионов водорода. Однако при этом значения водородного показателя электродных систем также имели лишь слабую отрицательную корреляцию с показателями напряжения в прикорневой зоне — $r = -0.18$ для верхних и $r = -0.16$ для нижних электродов.

Наличие в электрической цепи из нескольких БЭС отрицательной полярности в некоторых ячейках подтверждается и другими экспериментальными данными. Так, по результатам масштабирования РМТЭ с зеленой фасолью было показано, что слишком большое количество соединенных последовательно ячеек приводит к потерям напряжения из-за возможности возникновения реверсивного напряжения [18]. Было выдвинуто предположение, что изменение полярности напряжения БЭС может быть

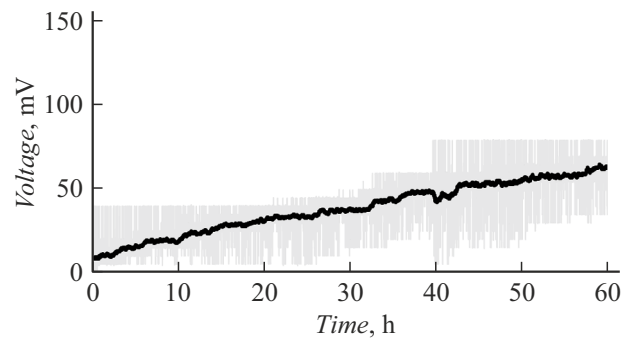


Рис. 6. Динамика зарядки ионистора емкостью 0.1 F от БЭС.

связано либо с приложением внешнего сопротивления, либо с изменением состояния биоупленки, формируемой на аноде [27].

6. Накопление генерируемой БЭС энергии

В работах [28,29] было предложено свести к минимуму уменьшение напряжения в батареях из БЭС либо контролируя напряжение каждой единичной ячейки и подключая в цепь только одинаковые элементы, либо поддерживая одинаковые условия работы в реакторе путем внешнего изменения характеристик элемента или смены его полярности.

На наш взгляд, более эффективным и менее затратным является увеличение мощностных характеристик БЭС путем выравнивания параметров напряжения единичных ячеек, например, с помощью аккумуляции энергии с использованием накопителя. В основном сохранение биоэнергии, генерируемой МТЭ и РМТЭ, реализуется путем подключения энергонакопителей, в качестве которых могут выступать конденсаторы или суперконденсаторы [30].

В качестве энергонакопителя для исследуемых растительных БЭС был использован ионистор — суперконденсатор с емкостью 0.1 F. Накопитель подключался к БЭС параллельно, мониторинг скорости зарядки осуществлялся с помощью автоматизированного вольтметра. На рис. 6 представлена динамика зарядки ионистора емкостью 0.1 F от ячейки БЭС при выращивании салата сорта Тайфун. Разность потенциалов, генерируемая в реакторе без внешней нагрузки, была порядка 150 mV. Время зарядки ионистора до выхода на плато, т.е. выравнивания напряжения БЭС и ионистора, составило около 40 h. Причем, видимо из-за высокого внутреннего сопротивления БЭС, напряжение, до которого зарядился конденсатор, не превысило четверти генерируемого в ячейке значения и было порядка 60 mV. Накопленная энергия составила 0.18 mJ с одной ячейки объемом 0.0018 m³. Интересно отметить, что после отключения внешней нагрузки от БЭС наблюдалось восстановление системы.

Характеристики ячеек БЭС, входящих в состав электрической цепи из двадцати последовательно соединенных элементов

Номер ячейки	Средняя разность потенциалов, mV	Высота растения, см	Масса надземной части растения, g	Масса корней, g	pH верхнего электрода	pH нижнего электрода
1	56 ± 17	21 ± 4	79 ± 7	8 ± 1	6.9 ± 0.2	6.2 ± 0.1
2	107 ± 11	24 ± 4	88 ± 6	14 ± 2	6.5 ± 0.2	6.2 ± 0.1
3	18 ± 13	21 ± 3	68 ± 6	14 ± 2	6.5 ± 0.1	6.5 ± 0.1
4	115 ± 13	21 ± 4	24 ± 6	10 ± 1	5.8 ± 0.1	5.9 ± 0.1
5	90 ± 4	20 ± 3	34 ± 5	11 ± 1	6.4 ± 0.2	6.3 ± 0.2
6	75 ± 8	19 ± 4	35 ± 6	9 ± 1	6.7 ± 0.2	6.2 ± 0.2
7	97 ± 36	27 ± 4	85 ± 7	19 ± 1	6.5 ± 0.1	6.3 ± 0.2
8	91 ± 9	28 ± 4	93 ± 7	14 ± 1	6.5 ± 0.2	6.2 ± 0.1
9	48 ± 7	22 ± 3	33 ± 6	9 ± 1	6.4 ± 0.1	5.8 ± 0.1
10	128 ± 13	22 ± 3	58 ± 6	13 ± 1	6.4 ± 0.1	6.1 ± 0.1
11	-33 ± 8	28 ± 5	68 ± 7	14 ± 1	6.7 ± 0.2	6.4 ± 0.2
12	151 ± 27	24 ± 4	53 ± 6	16 ± 1	6.5 ± 0.2	6.2 ± 0.1
13	-62 ± 18	26 ± 4	68 ± 6	14 ± 1	6.6 ± 0.1	6.3 ± 0.1
14	173 ± 23	18 ± 3	52 ± 5	12 ± 1	6.6 ± 0.1	6.4 ± 0.1
15	116 ± 15	19 ± 3	54 ± 5	8 ± 1	6.4 ± 0.1	6.0 ± 0.1
16	63 ± 14	20 ± 4	47 ± 6	16 ± 2	6.0 ± 0.1	6.2 ± 0.1
17	114 ± 28	23 ± 3	67 ± 5	20 ± 2	7.0 ± 0.1	6.6 ± 0.1
18	105 ± 25	18 ± 4	34 ± 6	8 ± 1	6.2 ± 0.1	6.3 ± 0.2
19	114 ± 36	20 ± 3	57 ± 4	17 ± 1	6.4 ± 0.2	6.2 ± 0.1
20	21 ± 13	24 ± 4	59 ± 6	13 ± 2	6.5 ± 0.2	6.3 ± 0.1

7. Примеры применения БЭС

БЭС могут служить источником питания для работы различных маломощных электронных приборов и датчиков, например, для онлайн-мониторинга параметров окружающей среды, качества воды, обнаружения загрязнений, оценки микробной активности [31]. МТЭ и РМТЭ также могут обеспечивать электропитанием небольшие электронные устройства, используемые в различных приложениях, такие, как фотодатчики, светодиодные источники света, датчики pH, мобильные устройств и т.д. [32].

Например, двухмодульный РМТЭ из 24 последовательно соединенных элементов емкостью 0.6 l с много-электродными системами, подключаемыми внутри БЭС параллельно, позволил обеспечить автономное питание цифрового термометра-гигрометра 1.5 V, а трехмодульный РМТЭ поддерживал электропитанием цифровой внутренний блок метеостанции 3 V или три светодиода в течение трех месяцев эксперимента [33]. Частичная зарядка мобильного телефона стала возможной после аккумуляции энергии генерируемой тремя РМТЭ [34]. Соединенные последовательно 12 РМТЭ при выращивании в них кактусов смогли обеспечить работу светодиодов и цифровых часов в режиме реального времени [35].

В условиях фитотехкомплекса [36] нами была апробирована работа „электростанции ElectroPlant“ при культивировании растений салата, содержащей 30 БЭС, накоп-

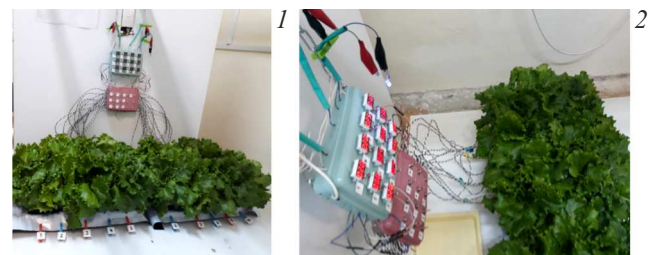


Рис. 7. 1 — „Электростанция ElectroPlant“ в условиях фитотехкомплекса, 2 — электропитание синего светодиода от энергонакопительного модуля, подсоединенного к тридцати БЭС.

ленной энергии от которой хватило на электропитание синего светодиода 3.3 V в течение 3 min (рис. 7).

Многообещающее применение технологии БЭС ожидается в робототехнике [37]. Например, были разработаны роботы, использующие энергию, генерируемую МТЭ на основе *E. coli*, для зарядки батарей и работы различных контроллеров [38]. Первой успешной демонстрацией робота, полностью работающего от 8 МТЭ, был Eсobot-II с рабочим циклом 12 дней [39]. Все эти примеры роботов и датчиков с автономным питанием с помощью БЭС можно считать энергетически самодостаточными средствами, которые можно использовать и в условиях космоса, и в удаленных от энергосетей местоположениях.

Заключение

Таким образом, были рассмотрены свойства БЭС, последовательно соединенных в электрические цепи, при выращивании растений салата методом паноупоники. Среднее значение напряжения одиночной ячейки БЭС составило 102 mV, а трех и двадцати последовательно соединенных — 197 и 1782 mV соответственно, что ниже ожидаемых значений на 36 и 13%. Эффект снижения суммарной мощности при создании батарей из БЭС отмечен многими исследователями, и связывается с наличием реверсивного напряжения и неравномерностью зарядки при наличии неоднородных элементов в цепи, что подтверждается и полученными нами данными, характеризующими свойства БЭС, входящих в состав электрической цепи. Наиболее эффективным путем масштабирования на данный момент выступает увеличение мощностных характеристик БЭС путем выравнивания параметров напряжения единичных ячеек, например, с помощью аккумуляции энергии с использованием накопителя.

Использование БЭС в сельском хозяйстве открывает широкий спектр возможностей для создания мало-мощных автономных источников возобновляемой электроэнергии. Энергия БЭС, с одной стороны, может обеспечить электропитание в естественных условиях для различных датчиков окружающей среды, сенсоров состояния растительных организмов, сигнализации, светодиодов. С другой стороны, в условиях закрытого грунта при аварийных ситуациях такая система может поддерживать работу жизнеобеспечивающих растений устройств, например, при временном отключении внешнего энергоснабжения, что необходимо для сохранности выращиваемых растений. БЭС можно будет легко комбинировать с выращиванием растительной продукции как в условиях ситифермерства, так и в открытом грунте. Также возможно применение в качестве биосенсора для мониторинга состояния растений и корректировки технологий выращивания.

Финансирование работы

Исследования выполнены при финансовой поддержке гранта № 23-26-10050 Российского научного фонда согласно соглашению 20.04.2023 г. № 23-26-10050 и Санкт-Петербургского научного фонда в соответствии с соглашением от 05.05.2023 г. № 23-26-10050.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

[1] В.Е. Logan. *Microbial Fuel Cells* (JohnWiley&Sons, NY., 2008), DOI: 10.1002/9780470258590

- [2] A.J. McCormick, P. Bombelli, R.W. Bradley, R. Thorne, T. Wenzel, C.J. Howe. *Energy Environmental Sci.*, **8** (4), 1092 (2015). DOI: 10.1039/C4EE03875D
- [3] D.P. Strik, H.V.M. Hamelers, J.F. Snel, C.J. Buisman. *J. Energy Research*, **32** (9), 870 (2008). DOI: 10.1002/er.1397
- [4] D. Pant, G. Van Bogaert, L. Diels, K. Vanbroekhoven. *Bioresour. Technol.*, **101** (6), 1533 (2010). DOI: 10.1016/j.biortech.2009.10.017
- [5] A.N. Ghadge, M. Sreemannarayana, N. Duteanu, M.M. Ghangrekar. *J. Electrochem. Sci. Eng.*, **4**, 315 (2014). DOI: 10.5599/jese.2014.0047
- [6] X. Li, N. Zhu, Y. Wang, P. Li, P. Wu, J. Wu. *Bioresour. Technol.*, **128**, 454 (2013). DOI: 10.1016/j.biortech.2012.10.053
- [7] N. Bourdakos, E. Marsili, R. Mahadevan. *Biotechnol. Bioeng.*, **111**, 709 (2014). DOI: 10.1002/bit.25137
- [8] P.J. Sarma, K. Mohanty. *An Insight into Plant Microbial Fuel Cells*. In R.N. Krishnaraj, R.K. Sani (ed.). *Bioelectrochemical interface engineering* (John Wiley & Sons, Inc., 2020), ch. 8, p. 137–148. DOI: 10.1002/9781119611103.ch8
- [9] R.A. Timmers, D.P. Strik, H.V. Hamelers, C.J.N. Buisman. *Appl. Microbiol. Biotechnol.*, **86**, 973 (2010). DOI: 10.1007/s0025301024407
- [10] K.R.S. Pamintuan, C.S.A. Reyes, D.K.O. Lat. *E3S Web of Conf. — EDP Sci.*, **181**, 01007 (2020). DOI: 10.1051/e3sconf/202018101007
- [11] P. Aelterman, S. Shah, R. Prasad. *Methodology Technol.*, **40** (17), 5181 (2006). DOI: 10.2174/1874070702115010131
- [12] M. Helder, D.P. Strik, H.V.M. Hamelers, C.J.N. Buisman. *Biotechnol. Biofuels*, **5** (1), 1 (2012). DOI: 10.1186/1754-6834-5-70
- [13] A.N. Ghadge, M.M. Ghangrekar, K. Scott. *J. Renew Sustain Energy*, **8** (4), 44302 (2016). DOI: 10.1063/1.4961587
- [14] E.D. Penteado, C.M. Fernandez-Marchante, M. Zaiat, E.R. Gonzalez, M.A. Rodrigo. *Brazilian. J. Chem. Eng.*, **35**, 141 (2018). DOI: 10.1590/0104-6632.20180351S20160411
- [15] D.A. Jadhav, A.K. Mungray, A. Arkatkar, S.S. Kumar. *Sustainable Energy Technol. Assessments*, **45**, 101226 (2021). DOI: 10.1016/j.seta.2021.101226
- [16] S. Cheng, B.E. Logan. *Bioresour. Technol.*, **102**, 4468 (2011). DOI: 10.1016/j.biortech.2010.12.104
- [17] A.N. Ghadge, D.A. Jadhav, M.M. Ghangrekar. *Environ. Prog. Sustain. Energy*, **35** (6), 1809 (2016). DOI: 10.1002/ep.12403
- [18] K.R.S. Pamintuan, A.M.C. Katipunan, P. Ann. O. Palaganas, A.R. Caparanga. *Intern. J. Renewable Energy Development*, **9** (3), 439 (2020). DOI: 10.14710/ijred.2020.29898
- [19] E.B. Estrada-Arriaga, Y. Guillen-Alonso, C. Morales-Morales, L.E. García-Sánchez, O. Bahena-Bahena, O. GuadarramaPérez, F. Loyola-Morales. *Water Sci. Technol.*, **76** (3), 683 (2017). DOI: 10.2166/wst.2017.253
- [20] A. Gurung, S.E. Oh. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization and Environmental Effects*, **34** (17), 1569 (2012). DOI: 10.1080/15567036.2012.660561
- [21] Г.Г. Панова, О.Р. Удалова, Е.В. Канаш, А.С. Галущко, А.А. Кочетов, Н.С. Прияткин, М.В. Архипов, И.Н. Черноусов. *ЖТФ*, **91** (10), 1633 (2020). DOI: 10.21883/JTF.2020.10.49792.429-19 [G.G. Panova, O.R. Udalova, E.V. Kanash, A.S. Galushko, A.A. Kochetov, N.S. Priyatkin, M.V. Arkhipov, I.N. Chernousov. *Tech. Phys.*, **65** (10), 1562 (2020). DOI: 10.1134/S1063784220100163]
- [22] В.А. Чесноков, Е.Н. Базырина, Т.М. Бушуева. *Выращивание растений без почвы* (Изд-во ЛГУ, Л., 1960)

- [23] Т.Э. Кулешова, А.В. Бушлякова, Н.Р. Галль. Письма в ЖТФ, **45** (5), 6 (2019).
DOI: 10.21883/PJTF.2019.05.47387.17541
- [24] Т.Э. Кулешова, Г.Г. Панова, Н.Р. Галль, А.С. Галушко. Письма в ЖТФ, **48** (8), 29 (2022).
DOI: 10.21883/PJTF.2022.08.52363.19066 [T.E. Kuleshova, G.G. Panova, N.R. Gall, A.S. Galushko. Tech. Phys. Lett., **48** (4), 66 (2022). DOI: 10.21883/TPL.2022.04.53176.19066]
- [25] Т.Э. Кулешова, Н.Р. Галль, А.С. Галушко, Г.Г. Панова. ЖТФ, **91** (3), 510 (2021).
DOI: 10.21883/JTF.2021.03.50531.185-20
- [26] A. Mukherjee, R. Patel, P. Zaveri, M.T. Shah, N.S. Munshi. Lett. Appl. Microbiol., **75** (785), 795 (2021).
DOI: 10.1111/lam.13612
- [27] M. Sugnaux, C. Savy, C.P. Cachelin, G. Hugenin, F. Fischer. Bioresour. Technol., **238**, 519 (2017).
DOI: 10.1016/j.biortech.2017.04.072
- [28] C. Santoro, C. Arbizzani, B. Erable, I. Ieropoulos. J. Power Sources, **356**, 225 (2017).
DOI: 10.1016/j.jpowsour.2017.03.109
- [29] S. Chen, S.A. Patil, R.K. Brown, U. Schröder. Appl. Energy, **233–234**, 15 (2019). DOI: 10.1016/j.apenergy.2018.10.015
- [30] D.A. Jadhav, PhD Dissertation (Kharagpur, Indian Institute of Technology Kharagpur, 2017)
- [31] B. Liu, Y. Lei, B. Li. Biosens. Bioelectron., **62**, 308 (2014).
DOI: 10.1016/j.bios.2014.06.051
- [32] A. Kaur, J. Rae, I. Michie, R.M. Dinsdale, A.J. Guwy, G.C. Premier. Biosens. Bioelectron., **47**, 50 (2013).
DOI: 10.1016/j.bios.2013.02.033
- [33] I. Rusyn, O. Medvediev. SSRN, [Preprint] (2022).
DOI: 10.2139/ssrn.4201005
- [34] J.C. Gomora-Hernandez, J.H. Serment-Guerrero, M.C. Carreno-de-Leon, N. Flores-Alamo. Rev. Mex. Ing. Quim., **19** (1), 227 (2020). DOI: 10.24275/rmiq/IA542
- [35] W. Apollon, L.L. Valera-Montero, C. Perales-Segovia, V.A. Maldonado-Ruelas, R.A. Ortiz-Medina, J.F. Gómez-Leyva, M.A. Vázquez-Gutiérrez, S. Flores-Benítez, S.K. Kamaraj. Sustain Energy Technol. Assess, **49**, 101730 (2022). DOI: 10.1016/j.scta.2021.101730
- [36] G.G. Panova, A.V. Teplyakov, A.B. Novak, M.A. Levinskikh, O.R. Udalova, G.V. Mirskaya, Yu.V. Khomyakov, D.M. Shved, E.A. Ilyin, T.E. Kuleshova, E.V. Kanash, Yu.V. Chesnokov. Agronomy, **13** (12), 3038 (2023).
DOI: 10.3390/agronomy13123038
- [37] I.A. Ieropoulos, J. Greenman, C. Melhuish, I. Horsfield. Chem. Sus. Chem., **5**, 1020 (2012). DOI: 10.1002/cssc.201200283
- [38] S. Wilkinson. Aut. Robots, **9**, 99 (2000).
- [39] C. Melhuish, I. Ieropoulos, J. Greenman. Aut. Robots, **21**, 187 (2006). DOI: 10.1007/s10514-006-6574-5