DOI 10.28983/asj.y2021i1pp24-28 «PLAMIC2020» УДК 631.171

РАСТИТЕЛЬНО-МИКРОБНЫЙ ТОПЛИВНЫЙ ЭЛЕМЕНТ НА ПРИМЕРЕ САЛАТА ПРИ КУЛЬТИВИРОВАНИИ МЕТОДОМ ПАНОПОНИКИ

КУЛЕШОВА Татьяна Эдуардовна, *Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН*
ГАЛЛЬ Николай Ростиславович, *Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН*
ГАЛУШКО Александр Сергеевич, *Агрофизический научно-исследовательский институт*
УДАЛОВА Ольга Рудольфовна, *Агрофизический научно-исследовательский институт*
ВЕРТЕБНЫЙ Виталий Евгеньевич, *Агрофизический научно-исследовательский институт*
ПАНОВА Гаянэ Геннадьевна, *Агрофизический научно-исследовательский институт*

Приведены результаты разработки экспериментальной ячейки растительно-микробного топливного элемента (РМТЭ), направленной на совместное получение электроэнергии и растительной продукции. Величина генерируемых в многосуточном режиме биоэлектрических потенциалов (БЭП) при использовании в качестве растительной культуры салата, культивируемого методом тонкослойной панопоники, составляет ~100 мВ. Показана важность обеспечения поверхностного электрического контакта корней с электродами. Отмечено, что в качестве электродвижущей силы (ЭДС) могут выступать как окислительно-восстановительные реакции в питательном растворе, так и корневая система растений. Рассмотрен вопрос о создании на основе исследованных РМТЭ батареи, приводящей к суммированию электрических параметров на длительный период (более 3 суток) лишь в случае однородности входящих в электрическую цепь элементов.

Введение. Биоэлектрохимические системы представляют собой альтернативные возобновляемые источники энергетических ресурсов. Новым перспективным направлением «зеленой» энергетики является растительно-микробный топливный элемент (РМТЭ), впервые созданный *D.P. Strik* и его группой в Нидерландах в 2008 г. Первое устройство ячейки, предложенное в работе [10], основывается на принципе действия двухкамерных микробных топливных элементов. Отличие заключается в том, что в анодной камере находится корневая система растений, а выделяемые ризодепозиты выступают в роли субстрата для электрогенных бактерий. Таким образом решается проблема постоянного добавления извне питательной среды для обеспечения жизнедеятельности электрогенных бактерий.

В настоящее время за рубежом направление РМТЭ активно развивается, разрабатываются различные модификации в виде трубчатой (tubular) модели [12], плоской пластины (flat-plate) [7], проточных систем [8] и др. В России же практически отсутствуют исследования, посвященные этой тематике. Известен лишь вариант исполнения биотопливного элемента [5], разработанный в Кубанском государственном университете, с использованием газонной травы.

Что касается перспектив выработки электроэнергии, по оценке, приведенной в [11], в естественных условиях максимальная выработка электроэнергии может составить 1,6–3,2 Вт/м^2 с площади, занимаемой растениями. Этого вполне достаточно для питания маломощных датчиков параметров окружающей среды или, например, насосов капельного полива. Технология РМТЭ применима для создания источников электроэнергии как в защищенном, так и в открытом грунте, например на водно-болотных угодьях, как предложено в [10]. Зарегистрированное напряжение в конфигурации РМТЭ с использованием манника крупного (*Glyceria maxima*) [10] составило 256 мВ на 72-й день вегетационного периода, максимальная плотность мощности достигала 67 мВт/м^2. Установлено, что выходная мощность осадочного микробного топливного элемента в 7 раз выше в присутствии активно растущих растений [9].

Для создания РМТЭ в основном используются водные растения – манник крупный (*Glyceria maxima* (Hartm.) Holmb.), рис, спартина английская (*Spartina anglica* C.E.Hubb.), арундо тростниковый (*Arundo donax* L.) [6] и травянистые растения – газонная трава [5], хлорофитум хохлатый (*Chlorophytum comosum* (Thunb.) Jacques) [13]. Перечисленные растения, за исключением риса, практически не могут быть использованы для получения наряду с электроэнергией продовольствия.

Цель данной работы заключалась в экспериментальном изучении возможности организации РМТЭ на основе биоэлектрических потенциалов (БЭП), создаваемых в ризосферной зоне, и разработке экспериментальной ячейки РМТЭ с использованием сельскохозяйственно значимой культуры.

Методика исследований. В качестве объекта исследования был выбран салат сорта Азарт. Испытания проводили в условиях интенсивной

светокультуры, для освещения растений использовали лампы ДНаТ, облученность составляла 70–75 Вт/м^2. Температуру воздуха поддерживали в пределах +20... +22 °С днем и +18... +20 °С ночью, относительную влажность воздуха – 65–70 %.

При выборе конфигурации РМТЭ (расположения и материалов электродных систем, субстрата для растений) за основу была взята система культивирования растений на тонкослойном или малообъемном аналоге почв – панопоника [3]. В емкости для выращивания располагается платформа, покрытая влагопроводящей тканью, частично погруженной в питательный раствор и поднимающей его до корневой шейки растения за счет капиллярного эффекта; на ткань наносится тонкослойный аналог почвы [4] и высаживается растительная культура. Было исследовано 8 вариантов организации ячеек (каждая объемом 0,0023 м^3), различающихся расположением электродов из графитового войлока относительно корневой системы и ткани, доставляющей питательный раствор (рис. 1): *вариант 1* – электрод III на дне емкости, сверху платформа, покрытая влагопроводящей тканью II, на ней электрод I с нанесенным на него аналогом почвы, на который высаживаются проросшие семена, элементы I, II и III соприкасаются; *вариант 2* – повтор варианта 1; *вариант 3* – элемент II покрывает не всю поверхность платформы и не соприкасается с электродом III, между ними слой питательного раствора в 1 см, такая организация позволяет проверить предположение об электрическом замыкании системы; *вариант 4* – повтор варианта 3; *вариант 5* – элемент I расположен под тканью II, все элементы соприкасаются, однако отсутствует поверхностный контакт электрода I и корневой системы растений; *вариант 6* – повтор варианта 5; *вариант 7* – электрод I расположен под тканью II, и она не соприкасается с электродом III; *вариант 8* – контроль, стандартная система культивирования для получения растительной продукции без электродов.

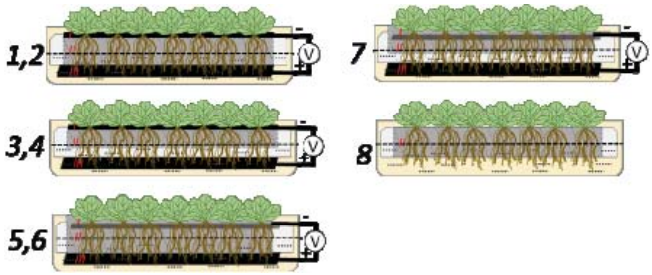

Рис. 1. Схематичное представление исследованных конфигураций ячеек РМТЭ при культивировании салата методом панопоники (I – верхний электрод, II – влагопроводящая ткань, III – нижний электрод, пунктирная линия – уровень питательного раствора). Варианты 1 и 2 – элементы I, II и III соприкасаются; варианты 3 и 4 – элементы II и III разнесены; варианты 5 и 6 – элемент I расположен под элементом II; вариант 7 – элемент I расположен под элементом II, II и III разнесены; вариант 8 – контроль

Растения салата высаживали на стадии проростков, по 25 штук на каждый вариант организации ячейки РМТЭ. Регистрация генерируемых БЭП осуществлялась автоматически каждые 15 мин с помощью разработанного нами неинвазивного атравматичного метода [2].

На протяжении вегетационных периодов проводили фенологические наблюдения. Реакцию овощной культуры на моделируемые условия оценивали по показателям роста и биохимическому составу получаемой растительной продукции. При уборке на 27-й день проведения эксперимента учитывали массу растений, их выживаемость, длину, ширину максимально развитого листа, высоту растений, число листьев, определяли содержание нитратов и других биохимических показателей. Биохимический состав растительной продукции, характеризующий ее качество и безопасность, определяли в аккредитованной на техническую компетентность и независимость Испытательной лаборатории ФГБНУ АФИ в соответствии с требованиями современных нормативных документов и по общепринятым методикам [1].

Статистическую обработку данных выполняли с помощью программного обеспечения MS Excel 2010. В тексте и таблицах приведены средние арифметические значения параметров и их доверительные интервалы при 95%-м уровне вероятности по t-критерию.

Результаты исследований. Результаты экспериментального исследования динамики биоэлектрических потенциалов в прикорневой зоне растений салата, генерируемых в ячейках РМТЭ с различным расположением электродов, показаны на рис. 2. Для всех полученных кривых наблюдалась общая тенденция – снижение БЭП от 50–100 до 5–25 мВ к 10-м суткам вегетационного периода и затем плавный рост.

Можно предположить, что в начале вегетационного периода, когда корневая система слабо развита и еще не достигла дна емкости, т.е. нижнего электрода, электрогенные свойства ячейки РМТЭ обусловлены окислительно-восстановительными реакциями в питательном растворе.

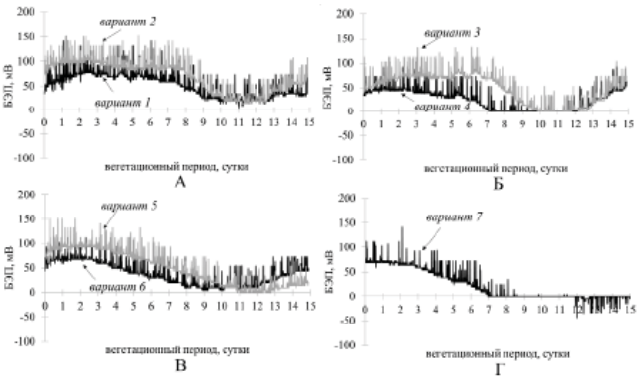

Рис. 2. Динамика БЭП при различных вариантах организации ячеек РМТЭ: А – варианты 1 и 2; Б – варианты 3 и 4; В – варианты 5 и 6; Г – вариант 7

В качестве электродвижущей силы (ЭДС) выступают химические реакции и создаваемая разность потенциалов на верхнем электроде, находящемся в воздушной среде, и нижнем электроде, погруженном в раствор Кнопа. По аналогии с химическими источниками тока, электроны по внешней цепи движутся от анода к катоду, то есть от положительно заряженного нижнего электрода к отрицательному верхнему. Плавное снижение БЭП может быть следствием установления равновесия в концентрациях ионов на электродах и замедления процессов восстановления на катоде.

Наблюдаемый на 12–13-е сутки вегетационного периода рост БЭП, вероятно, связан с развитием корневой системы и установлением поверхностного электрического контакта с нижним электродом. В этом случае корни играют роль дополнительной ЭДС. Меньшая величина биопотенциалов (на ~30 %), генерируемая в вариантах организации ячейки РМТЭ 5 и 6, в которых отсутствует контакт корневой шейки с верхним электродом, и изменение полярности в варианте 7 также указывают на значимость для электрогенеза процессов транспорта ионов корнями.

После роста значений БЭП до ~50 мВ на 15-е сутки проведения эксперимента варианты РМТЭ 1–6 были объединены в батарею путем их последовательного соединения для рассмотрения возможности увеличения напряжения (рис. 3).

Ключевым для рассматриваемых РМТЭ недостатком последовательного соединения является неравномерность разрядки и зарядки при неоднородных элементах, входящих в батарею. В первые двое суток отмечаются ожидаемое суммирование напряжения до ~400 мВ. Однако уже на 18-е сутки наблюдается значительное снижение до ~120 мВ. Кроме внешней нагрузки на каждую ячейку РМТЭ, что, по всей видимости, имеет значительное влияние на электрогенные свойства растений, при включении в цепь, более емкие элементы недоразряжаются, а менее емкие переразряжаются. Действительно, после рассоединения наблюдается снижение величины БЭП до ~25 мВ во всех вариантах, а в ячейке 2 еще и смена полярности (рис. 4).

Для проверки возможности подключения к РМТЭ внешнего потребителя тока на 23-и сутки к варианту 3 было параллельно подключено нагрузочное сопротивление 10 Ом, а к варианту 4 – 1,1 кОм. Такое, вероятно, стрессовое воздействие привело к падению БЭП до уровня шумов (см. рис. 4Б). После снятия нагрузки на 25-е сутки вегетационного периода наблюдалось медленное восстановление системы.

Рис. 3. Динамика БЭП при последовательном соединении в электрическую цепь вариантов 1–6 организации ячеек РМТЭ.

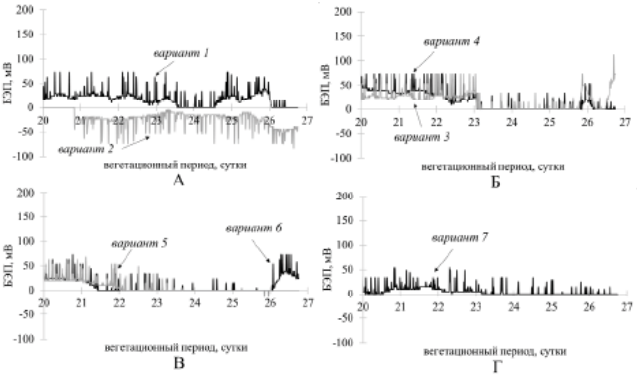

Рис. 4. Динамика БЭП при различных вариантах организации ячеек РМТЭ после их последовательного соединения в батарею: А – варианты 1 и 2; Б – варианты 3 и 4; В – варианты 5 и 6; Г – вариант 7

Установка электродов в ячейки для выращивания и подключение внешней цепи не отразились на показателях роста, продуктивности и качестве полученной растительной продукции (табл. 1). Масса салата во всех опытных вариантах даже превосходила таковую в контрольной системе, без РМТЭ. Это является следствием более низкой выживаемости растений в контрольной ячейке, без электродов. Возможно, значительная толщина графитового войлока (5 мм) по сравнению с толщиной влагопроводящей ткани (~0,3 мм), на которые высаживались проростки салата, позволила удерживать большое количество питательных веществ для растения, что и послужило более плотному размещению салата – 22–24 растения на 0,039 м^2. Остальные параметры (площадь листа, высота растений, содержание сухого вещества) практически не различались для всех вариантов и лежали в диапазоне значений, обычно получаемых при стандартном культивировании методом панопоники. Полученный диапазон масс корней 10,7–18,7 г, на первый взгляд, не коррелирует с величиной БЭП в рассматриваемых РМТЭ.

Биохимический состав растительной продукции (табл. 2) также показал хорошие результаты. Содержание нитратов незначительно превысило ПДК только в вариантах организации РМТЭ 3 и 7. Количество минеральных веществ и витамина С в контрольном варианте было на 5–25 % выше, что говорит о некотором не критичном влиянии графитового войлока на состав растительной культуры.

Заключение. Предложен ряд конфигураций РМТЭ с использованием культивирования растений методом панопоники, различающихся расположением электродов и элемента, доставляющего питательный раствор. Вариант органи-

Таблица 1

Показатели роста и продуктивности растений салата при различных вариантах организации ячеек РМТЭ

Вариант	Урожайность, кг/м^2	Выживаемость растений, %	Высота растений, см	Площадь листа, см^2	Сухое вещество листьев, %	Масса корней, г	Сухое вещество корней, %
1	4,6	96	25±5	114±46	4,6	13,5	6,4
2	4,9	96	28±2	120±27	5,1	12,2	6,3
3	4,8	92	25±7	156±63	4,5	13,4	5,5
4	4,3	88	25±4	159±74	4,4	10,7	6,3
5	5,4	88	25±4	151±62	4,8	18,7	8,2
6	4,6	92	26±5	146±39	4,8	14,4	8,9
7	4,7	88	26±5	151±54	4,4	17,7	7,3
8	3,0	56	23±3	163±49	5,2	15,3	7,8

Таблица 2

Биохимический состав растительной продукции при различных вариантах организации ячеек РМТЭ

Показатель	Вариант				
	1, 2	3, 4	5, 6	7	8 (контроль)
Влажность, %	95,4	95,4	95,2	95,4	95,4
Сырая зола, % а.с.в.	16,7	17,3	19,8	17,3	20,9
Витамин С, мг/100 г н.в.	9,74	11,66	10,56	11,88	13,42
Нитраты, мг/кг н.в.	1055	2010	1920	2204	1876

зации, в котором обеспечивался поверхностный контакт корневой шейки с верхним электродом и корней с нижним электродом, показал более стабильную генерацию БЭП на уровне 100 мВ.

Сделано предположение о существовании двух стадий проявления электрогенных свойств – первой (начальной), основанной на химических реакциях в питательном растворе, и второй, связанной с развитием корневой системы и формированием за счет этого дополнительной ЭДС.

Показана возможность увеличения выходного напряжения за счет последовательного соединения ячеек РМТЭ. Однако при этом отмечена нестабильность такой батареи, проявляющаяся в снижении величины БЭП на 70 % при многодневном использовании и связанная с неоднородностью входящих в нее элементов.

Таким образом, создаваемый в процессе роста растений градиент биоэлектрических потенциалов в ризосферной зоне совместно с работой микроорганизмов может стать альтернативным перспективным источником экологически чистого биоэлектричества. Растительно-микробный топливный элемент, в котором основная электродвижущая сила создается корнями растений, может быть использован как для создания маломощных источников постоянного тока, способных частично обеспечить жизнедеятельность растений за счет снабжения электропитанием насосов капельного полива, циркуляционных насосов, различных датчиков параметров окружающей среды и физиологического состояния растений, так и для применения в научных исследованиях в области растениеводства, агрофизики, биофизики растений в качестве биосенсора для мониторинга состояния растительного организма и корректировки технологий выращивания.

РМТЭ, выполненный в виде агробиотехнологического энергетического комплекса, основанного на рециклинге, может быть реализован при выращивании растений в условиях естественного освещения. При этом накопленное электричество, вырабатываемое в прикорневой зоне, можно расходовать в темный период для освещения границ клумб, дорог и т.д. Кроме того, в условиях интенсивной светокультуры для питания фитотехкомплекса, в том числе в аварийном режиме, при временном отключении внешнего энергоснабжения, что необходимо для сохранности выращиваемых растений. Ожидаемая производительность составляет 3000 кВт·ч в год на 100 м^2.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Ермаков А.И., Арасимович В.В., Ярош Н.П.* Методы биохимического исследования растений. – Л.: Агропромиздат, 1987.

2. *Кулешова Т.Э., Бушлякова А.В., Галль Н.Р.* Неинвазивное измерение биоэлектрических потенциалов растений // Письма в ЖТФ. – 2019. – Т. 45. – № 5. – С. 6–8.

3. Основы физического моделирования «идеальных» агроэкосистем / Г.Г. Панова [и др.] // Журнал технической физики. – 2020. – Т. 90. – № 10. – С. 1633–1639.

4. *Черноусов И.Н., Панова Г.Г., Удалова О.Р., Александров А.В.* Патент РФ на полезную модель. 2019. № 189309. Бюл. № 15.

5. *Шеремет В.В., Волченко Н.Н., Самков А.А.* Влияние состава питательной среды и растительного компонента на электрогенез в растительно-микробном топливном элементе // Биотехнология и общество в XXI веке. – 2015. – С. 429–431.

6. *Deng H., Chen Z., Zhao F.* Energy from plants and microorganisms: progress in plant–microbial fuel cells // ChemSusChem., 2012, Vol. 5, No. 6, P. 1006–1011.