

АНАЛИЗ НА РАБОТАТА НА СЕДИМЕНТНИ МИКРОБНИ ГОРИВНИ КЛЕТКИ, ЗАСАДЕНИ С РАЗЛИЧНА РАСТИТЕЛНОСТ

Росен Иванов, Светлана Браткова, Анатолий Ангелов

Минно-геоложки университет "Св. Иван Рилски", 1700 София, e-mail: rosen_iv@abv.bg

РЕЗЮМЕ. Седиментните микробни горивни клетки (СМГК) са сравнително нова технология, принципино различаваща се от класическата микробна горивна клетка, в които окисляеми въглеродни съединения и други компоненти в утайката или подобни среди се използват за производство на енергия. Растителните СМГК трансформират слънчевата енергия по екологично чист и ефективен начин, чрез интегриране на корените на живо растение в анодната област на седиментната микробна горивна клетка. Настоящото изследване е свързано с определяне на ефективността на СМГК, в които вегетира различна растителност. За целите на проучването са използвани пет седиментни микробни горивни клетки, в три от които са засадени типични водолюбиви растения (*Carex acuta*, *Carex disticha*, *Typha angustifolia*), в една е извършена инокулация със смесена култура зелени и синьозелени водорасли (*Chlorella*, *Scenedesmus*, *Oscillatoria*), а последната седиментна клетка служи за контрола. Субстратът за седиментните микробни горивни клетки е избран след предварителен анализ на електрохимичните показатели при различни съотношения почва – торф. След двумесечен период на вегетация са определени основни електрически параметри, рН, окислително-редукционен потенциал, електропроводимост, перманганатна окисляемост и концентрация на биогенни елементи във водите. Получените данни показваха, че най-добри електрохимични параметри се постигат в седиментна клетка засадена с *Carex disticha*.

Ключови думи: Растителни седиментни микробни горивни клетки, Седиментни микробни горивни клетки

ANALYSIS OF THE SEDIMENT MICROBIAL FUEL CELLS OPERATION, PLANTED WITH DIFFERENT VEGETATION

Rosen Ivanov, Svetlana Bratkova, Anatoliy Angelov

University of Mining and Geology "St. Ivan Rilski", 1700 Sofia, e-mail: rosen_iv@abv.bg

ABSTRACT. Sediment microbial fuel cells (SMFC) are a relatively new technology, fundamentally different from the main microbial fuel cell, in which the oxidizable carbon compounds and other components of the sludge are used for energy production. The plant SMFCs transform the solar radiation into green electricity in a clean and efficient manner through the integration of roots of a living plant in the anodic compartment of a SMFC. This study is related to determination of the efficiency of SMFC where vegetate different plants. For the purposes of this study are used five sediment microbial fuel cells, three of which are planted with typical water plants (*Carex acuta*, *Carex disticha*, *Typha angustifolia*), one is inoculated with a mixed culture of algae (*Chlorella*, *Scenedesmus*, *Oscillatoria*) and the last sediment cell is used as a control. The substrate for sediment microbial fuel cells is selected after preliminary analysis of electrochemical parameters in different ratios soil - peat. After two months of vegetation were studied basic electrical parameters, pH, redox potential, conductivity, permanganate oxidation and concentration of nutrients into the water. From the obtained data it is found that the best electrochemical parameters are achieved in sediment cell planted with *Carex disticha*.

Keywords: Plant sediment microbial fuel cells, Sediment microbial fuel cells

Въведение

В природата често се наблюдават окислително-редукционни градиенти в различни морски и сладководни седименти. Тези градиенти са резултат от пространственото разделяне на микробно-медираните окислително-редукционни реакции, свързани с биологичното разграждане на органичните съединения съдържащи се в седимента (Bardarov et al., 2013). Седиментните микробни горивни клетки (СМГК) са един от алтернативните възобновяеми и устойчиви енергийни източници. СМГК произвеждат енергия от разликата в електрическия потенциал между аеробната зона (водата) и анаеробната зона (седимента) (Реева et al., 2012). Микроорганизмите в утайката разграждат органичната материя, като по този начин продуцират електрони и протони. Електроните се прехвърлят към катода чрез външна електрическа верига, докато протоните преминават

през почвения слой, играещ ролята на своеобразна мембрана (Vojun et al., 2015).

Растителните седиментни микробни горивни клетки (РСМГК) трансформират слънчевата енергия по екологично чист и ефективен начин, чрез интегриране на корените на живо растение в анодната област на седиментна микробна горивна клетка. Корените на растенията екскретират органични съединения и подпомагат развитието на електрохимично активни ризосферни бактерии (Kothapalli, 2013). Бактериите в анодната област играят съществена роля за по-висока мощност на клетката. Основно предимство на растителните седиментни микробни горивни клетки е устойчивостта, поради непрекъснатото продуциране на въглерод от кореновата система на растенията. Производството на електричество чрез улавяне на слънчевата енергия от растения и комбинацията им с

микробни горивни клетки е атрактивно, защото тези системи обещават генерирането на енергия от възобновяем източник по устойчив начин (Kwong-Yu et al., 2013). Към момента енергията генерирана от растителните седиментни микробни горивни клетки се запазва сравнително ниска. Най-новите изследвания показват, че растителни СМГК със сладководни растения, могат да генерират максимална плътност на мощността варираща от няколко до десетки mW/m². Предизвикателствата за подобряване на производителността включват намаляване на вътрешното съпротивление на системата и подобряване активността на двата електрода.

Водните растения са основния избор за растителните седиментни микробни горивни клетки. Избора на подходящо растение е от важно значение за генериране на по-висока електроенергия. Използването на многогодишни водни растения намалява разходите за ежегодно засаждане на нови растения (Mahesh et al., 2014). Продуцираната енергия от растителни седиментни микробни горивни клетки може да има различно приложение, но за генерирането на по-голяма мощност и рентабилно прилагане са нужни допълнителни изследвания по отношение конструкция, използвани електроди, вегетираща растителност и други. Настоящото изследване е насочено именно към установяване влиянието на видът вегетираща растителност върху ефективността на горивния елемент.

Материали и методи

С цел избор на оптимален субстрат за растителни седиментни микробни клетки са разработени пет варианта седиментни микробни горивни клетки (таблица 1) с различно съотношение на седимент от влажна зона и торф (таблица 2) в субстрата. Седиментната микробна горивна клетка се състои от пластмасов съд с обем 1000 см³. Запълнени са със субстрат с обем 800 см³. След поставяне на субстрата, клетките са запълнени с вода. На дъното на клетката е поставен електрод от неръждаема стомана с площ 0.0040 м². На повърхността във водния слой е разположен втори електрод от неръждаема стомана с площ 0.0030 м².

Таблица 1.

Състав на субстрата в СМГК

Вариант	Съотношение Седимент : Торф
1	Седимент
2	Седимент:Торф – 3:1
3	Седимент:Торф – 1:1
4	Седимент:Торф – 1:3
5	Торф

Таблица 2.

Химичен състав на торфа

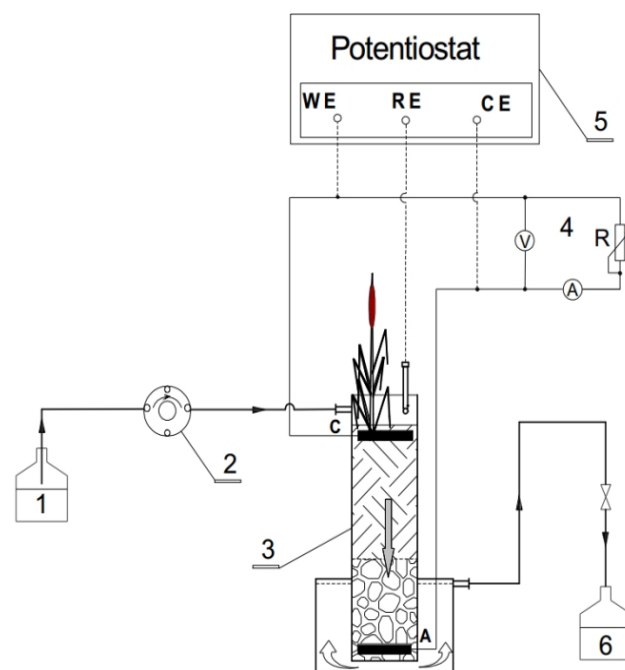
N (NH ₄ и NO ₃)	100 – 250 mg/l
P (P ₂ O ₅)	120 – 300 mg/l
Fe	до 65 g/m ³
Микроелементи	50 g/m ³
pH	5.5 – 6.5
Електропроводимост	1 – 2 mS/cm

Изработени са общо пет растителни седиментни микробни горивни клетки. РСМГК (Фигура 1) се състои от цилиндрична основа с обем 3650 см³. Дъното на съда е покрито със слой чакъл с дебелина 7 см (≈ 3 кг). Размерът на частиците е от 10 до 20 мм. В центъра на съда е поставена перфорирана в основата PVC тръба с диаметър 110 мм и височина 440 мм. В основата на тръбата е поставен електрод от неръждаема стомана, с дължина 112 см и ширина 4 см. Електродът е навит на спирала, чиято площ е 364 см². Електродът е покрит със слой чакъл с дебелина 7 см. Нагоре тръбата е запълнена със смес от седимент и торф в съотношение 3:1. В три от седиментните микробни горивни клетки е засадена влаголюбива растителност (теснолистен папур, тръстика и острица), а една е инокулирана с микроводорасли и цианобактерии. В контролата не е засадена растителност и не е осъществена инокулация със синьозелени водорасли (Таблица 3). Съоръженията са запълнени с вода и в повърхностния слой на водата е поставен втори електрод, играещ ролята на катод. Катодът е изработен от неръждаема стомана с въглеродно покритие за по-добра проводимост. Размерите на катода са: дължина 400 мм и широчина 20 мм. Катодът също е навит спираловидно.

Таблица 3.

Схема на експеримента

Вариант	Растения
1	Остра острица (<i>Carex acuta</i>)
2	Двуредна острица (<i>Carex disticha</i>)
3	Теснолистен папур (<i>Typha angustifolia</i>)
4	Водорасли (р. <i>Chlorella</i> , <i>Scenedesmus</i> и <i>Oscillatoria</i>)
5	Контрола без растения и водорасли

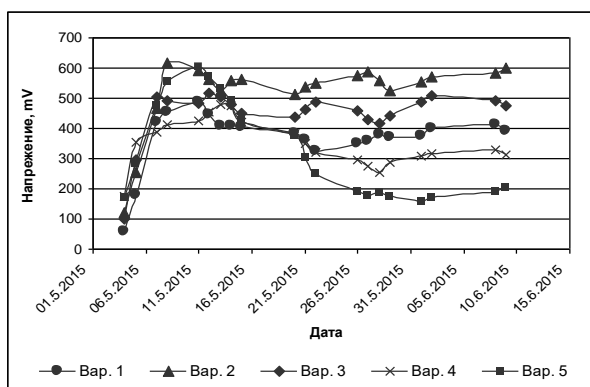


Фиг. 1. Схема на лабораторната инсталация на растителна седиментна микробна клетка

1 – Изходящ разтвор; 2 – Перисталтична помпа 3 – Растителна седиментна микробна горивна клетка, 4 – Мултицет, 5 – Потенциостат, 6 – Събирателен съд

Резултати и обсъждане

След запълване със субстрат и поддържане на постоянно ниво на водата в РСМГК, в продължение на месец беше следено напрежението при отворена верига. Данни от изследването са представени на фигура 2.

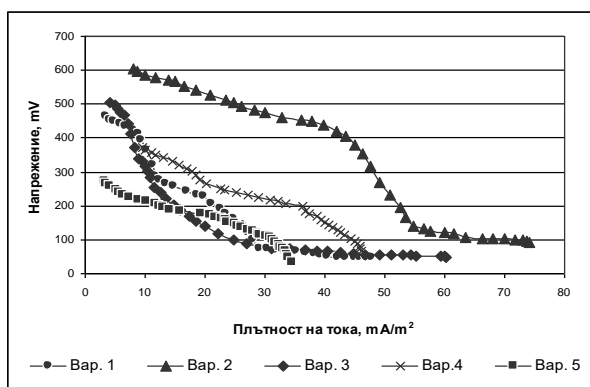


Фиг. 2. Динамика на напрежение при отворена верига в петте варианта седиментни клетки

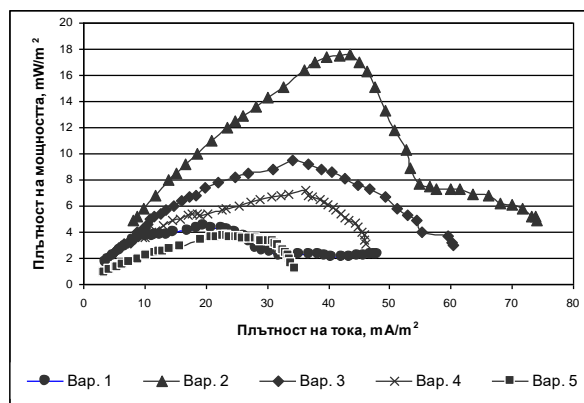
От фигура 2 се вижда, че след няколко дневно стабилизиране на отделните клетки, най-високо напрежение при отворена верига през целия период на експеримента се поддържа в седиментна клетка Вариант 2, при който съотношението седимент:торф е 3:1. Стойностите на напрежението се поддържат в интервала 510 – 600 mV. При използването на седимент като субстрат (вариант 1) напрежението при отворена верига през последните две седмици от експеримента бе в интервала 390 – 410 mV.

От получените резултати може да бъде направен извода, че с повишаване на количеството на торфа (варианти 3, 4 и 5) напрежението при отворена верига намалява, което най-вероятно се дължи на по-високата йонна сила на разтвора. Най-лоши резултати показва седиментна клетка Вариант 5, запълнена със субстрат торф, при която напрежението спадна под 200 mV в края на експеримента

След стабилизиране на електрохимичните параметри, бяха свалени поляризационни криви на петте варианта. На фигури 3 и 4 е направено сравнение съответно на напрежението и плътността на мощността на седиментните микробни горивни клетки.



Фиг. 3. Сравнение на напрежението на петте варианта седиментни микробни горивни клетки



Фиг. 4. Сравнение на плътността на мощността на петте варианта седиментни микробни горивни клетки

Данните показват, че най-високо напрежение и плътност на мощността се достига в седиментна клетка Вариант 2 (седимент:торф – 3:1). Максималната мощност при нея е 17.56 mW/m², при плътност на тока 43,46 mA/m² и приложено съпротивление 400Ω. Най-лоши електрохимични показатели са установени в седиментна клетка Вариант 5 (торф). Максималната достигната плътност на мощността е 3,69 mW/m² при плътност на тока 23,56 mA/m². Лошите резултати при Вариант 5 се дължат на високото съдържание на биогенни и микро елементи в субстрата, от където и увеличената проводимост на разтвора. Тъй като от проведеня експеримент се установи, че ефективността на седиментна клетка - вариант 2 е най-висока, като субстрат за растителните седиментни микробни горивни клетки бе избрана смес от седимент и торф в съотношение 3:1.

След двумесечен период на вегетация, в РСМГК са определени основни електрически параметри, pH, окислително-редукционен потенциал, електропроводимост, перманганатна окисляемост и концентрация на биогенни елементи във водите (фосфати, нитрати и амониев азот)(Таблица 4).

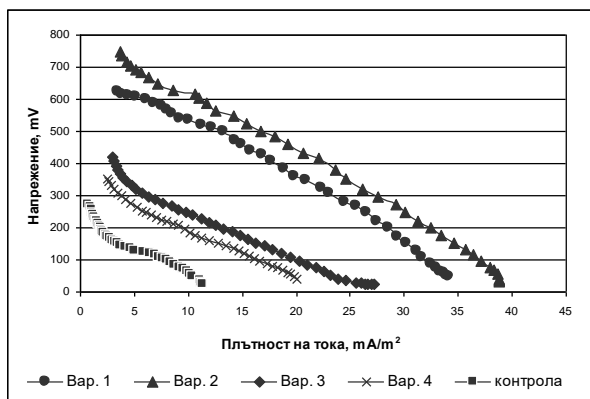
Таблица 4. Основни химични параметри на РСМГК-и

Вар.	pH	Eh, mV	ЕС, mS/cm	ПО, mg/l	PO ₄ ³⁻ , mg/l	NO ₃ ⁻ , mg/l	NH ₄ ⁺ , mg/l
1	6,68	310	1,1	27,02	3,46	1,25	4,66
2	6,7	349	0,76	27,87	2,06	0,8	2,92
3	6,44	335	0,68	20,63	3,75	0,97	4,25
4	6,64	290	0,71	47,15	4,69	1,33	7,55
5	6,53	276	1,12	37,02	5,04	2,58	6,73

При всички варианти pH на водата в повърхностната зона е в диапазона 6.44 – 6.7. По-окислителни условия (Eh в интервала 310 – 349 mV) са установени във вариантите с висши растения, което е свързано с по-интензивни процеси на фотосинтеза. Данните за перманганатна окисляемост показват, че при тези варианти концентрацията на разтворени органични вещества е по-ниска от варианта с водорасли и контролата. Най-високи стойности на този параметър са установени във водите на вариант 4 – водорасли, вероятно вследствие на отделени от тези организми органични съединения. В сравнение с

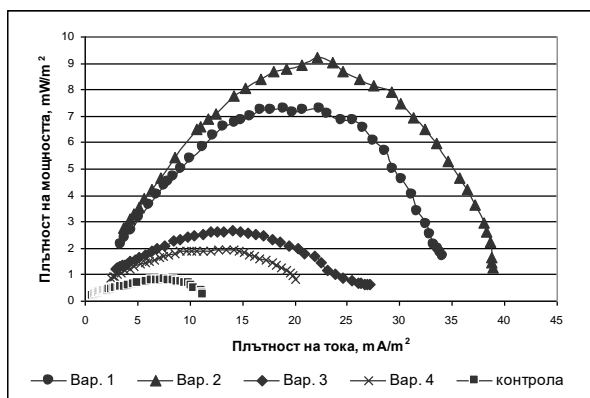
контролата концентрациите на всички биогенни елементи са по-ниски, което се дължи на асимилацията им от вегетиращите растителни видове и алги.

Данни за измерени електрически параметри на представени на фигури 5 и 6. Максимални стойности на напрежение и плътност на мощността са установени във вариант 2 - двуредна острица (*Carex disticha*). Напрежението при отворена верига при този вариант е 791 mV. Максимална плътност на мощността - 9,2 mW/m² е установена при приложено напрежение 200 Ω.



Фиг. 5. Сравнение на напрежения от поляризационни криви на различните варианти

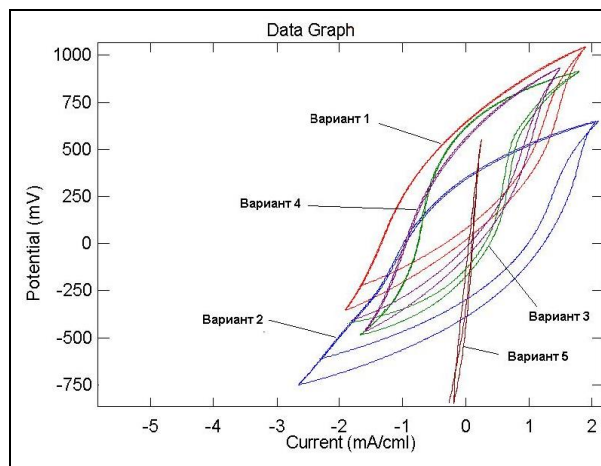
По-ниски стойности на горепосочените параметри са установени във вариант 1 -остра острица (*Carex acuta*). Със значително по-ниско напрежение и плътност на мощността се характеризираха растителните седиментни горивни клетки варианти 3 (теснолистен папур (*Typha angustifolia*) и 4 (алги), но от фигурата се вижда, че наличието на фотосинтезиращи организми е от ключово значение за създаване на потенциал между аеробната и анаеробната зона.



Фиг. 6. Сравнение на плътност на мощността от поляризационни криви на различните варианти

Най-ниска максимална стойност на плътността на мощността - 0,8 mW/m² е установена в контролата, при която няма вегетация на фотосинтезиращи организми.

Подобни изводи са направени и от цикличните волт-амперни характеристики на петте варианта растителни седиментни клетки представени на фигура 7.



Фиг. 7. Сравнение на цикличните волт-амперни характеристики на петте варианта РСМГК

Получените резултати от цикличните волт-амперни характеристики на растителните седиментни микробни горивни клетки допълнително потвърждават заключението, че от петте варианта РСМГК, най-ефективна е Вариант 2 – Двуредна острица (*Carex disticha*). От фигура 7 се установява че, амплитудите на потенциалите при другите четири варианта са по-ниски, същото се установява и за площите на получените хистерезиси. От анализа на CVA-диаграмите може да се направи извода, че най-лоши електрохимични характеристики се установяват при Вариант 5 – контрола.

Изводи

От проведените изследвания са получени резултати по отношение влиянието на субстрата (различно съотношение седимент:торф) в седиментни микробни горивни клетки. С най-добри параметри се характеризира варианта със съотношение седимент:торф - 3:1. При тази седиментна клетка беше достигната максимална плътност на мощността от 17.56 mW/m², при плътност на тока 43.46 mA/m² и товарно съпротивление 100Ω. Получените резултати са използвани при избор на субстрат за конструиране на растителни седиментни микробни горивни клетки.

В изработените РСМГК след двумесечен период на вегетация се установи, че окислително-редукционния потенциал има по-високи стойности (в интервала 310 – 349 mV) във вариантите с висши растения, което е свързано с по-интензивни процеси на фотосинтеза. Максимални стойности на напрежение и плътност на мощността са установени във вариант 2 - двуредна острица (*Carex disticha*). Напрежението при отворена верига при този вариант е 791 mV, а максималната плътност на мощността - 9,2 mW/m² е изчислена при товарно съпротивление от 200 Ω. Със значително по-ниско напрежение и плътност на мощността се характеризираха седиментната горивна клетка с алги и контролата. Получените резултати от цикличните волт-амперни характеристики на РСМГК също потвърждават заключението, че при вегетацията на вида двуредна острица (*Carex disticha*) се постигат най-добри показатели – максимални амплитуди на потенциалите и площ на получения хистерезис.

Литература

- Bardarov I., Hubenova Y., Mitov M. Sediment microbial fuel cell utilizing river sediments and soil. *Bulgarian Chemical Communications*, Volume 45, Special Issue A (pp. 223 – 226) 2013.
- Bojun Xu, Zheng Ge, Zhen He. Sediment microbial fuel cells for wastewater treatment: challenges and opportunities. *Environmental Science - Water Research & Technology*. 2015, 1, 279 p.
- Kothapalli Ananta, Sediment microbial fuel cell as sustainable power resource, *UWM Digital Commons*, University of Wisconsin-Milwaukee, December 2013.
- Kwong-Yu Chan, Chi-Ying Vanessa Li. *Electrochemically enabled sustainability - Devices, materials and mechanisms for energy conversion*. New York, CRC Press, 2014. 100 – 102 p.
- Mahesh.S, Tadesse Desalegn, Melkamu Alemayehu, Evaluation of photosynthetic microbial fuel cell for bioelectricity production. *Indian Journal of Energy*, Vol: 2, Issue: 4 April 2013, ISSN 2278-9278.
- Peeva Gergana, Yemendzhiev Husein, Bonev Bogdan, Nenov Valentin. Investigation of sediment microbial fuel cells operation with algae bio-cathode. *Management and education*, Vol. VIII (4), 2012.

Статията е препоръчана за публикуване от кат. "Инженерна геоекология".