

УДК 541.6+544.1

ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ МИКРОБНЫХ ТОПЛИВНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ НА ОСНОВЕ ШТАММА *Micrococcus luteus*, НОВЫХ ИОНООБМЕННЫХ МЕМБРАН И РАЗЛИЧНЫХ САХАРОВ

© 2023 г. А. Н. Чеснокова^а, *, С. А. Закарчевский^а, Г. О. Жданова^б, Д. И. Стом^{а, б, с, **}

^аИркутский национальный исследовательский технический университет, Иркутск, Россия

^бИркутский государственный университет, Иркутск, Россия

^сБайкальский музей СО РАН, п. Листвянка, Иркутская область, Россия

*e-mail: chesnokova@istu.edu

**e-mail: stomd@mail.ru

Поступила в редакцию 30.03.2022 г.

После доработки 15.01.2023 г.

Принята к публикации 06.02.2023 г.

В работе изучали физико-химические и электрохимические характеристики микробных топливных элементов (МТЭ) с новой протонообменной мембраной. Она синтезирована на основе сшитого сульфоянтарной кислотой поливинилового спирта, допированного цеолитом ВЕА (ПВС-СЯК-ВЕА). В качестве сравнительного образца использовали промышленную мембрану МФ-4СК (Пластполимер, Россия). Субстратами служили различные сахара (глюкоза, арабиноза, галактоза, ксилоза). Роль биоагента выполнял штамм *Micrococcus luteus* 1-и. МТЭ с мембранами ПВС-СЯК-ВЕА и МФ-4СК показали довольно близкие электрохимические характеристики. Более высокий выход электричества отмечали при добавлении глюкозы, галактозы, наименьший – при использовании ксилозы. Полученные данные свидетельствуют о перспективности применения предложенной мембраны ПВС-СЯК-ВЕА в качестве альтернативы широко используемым в технологии топливных элементов протонообменным мембранам.

Ключевые слова: микробный топливный элемент, протонообменная мембрана, *Micrococcus luteus*, поливиниловый спирт

DOI: 10.31857/S0424857023090050, **EDN:** MXQDPR

ВВЕДЕНИЕ

На сегодняшний день микробные топливные элементы (МТЭ) являются одной из наиболее перспективных областей альтернативной энергетики. С их помощью возможна переработка биоразлагаемых отходов, очистка бытовых и промышленных сточных вод с выработкой электричества [1–4]. Однако применение данной технологии в широкой практике лимитируется высокой стоимостью конструктивных компонентов МТЭ. Наиболее дорогостоящим элементом МТЭ является ионообменная мембрана [5–8]. Одним из возможных решений данной проблемы является конструирование безмембранных МТЭ. Они могут функционировать по типу бентосных МТЭ, где роль мембраны выполняет большой слой жидкости [9]. Существуют также однокамерные МТЭ с воздушным катодом [10, 11].

Однако описанные конструкции имеют сниженную стабильность работы, в первом случае – из-за чувствительности к перемешиванию, во втором – из-за необходимости поддержания ка-

тода в увлажненном состоянии. В этом отношении двухкамерная модель с разделением анодной и катодной зон предпочтительнее. Таким образом, разработка новых мембранных материалов, пригодных для использования в МТЭ для разделения анодной и катодной камер, является весьма актуальной.

Ранее нами была предложена мембрана на основе сшитого сульфоянтарной кислотой поливинилового спирта, допированная активированным серной кислотой цеолитом ВЕА (ПВС-СЯК-ВЕА) [12]. Введение допанта привело к значительному повышению ионообменной емкости, протонной проводимости и механической прочности мембран, а также снижению водопоглощения.

Целью данной работы являлось изучение электрохимических характеристик МТЭ со штаммом *Micrococcus luteus* 1-и при использовании различных моносахаридов в МТЭ на основе новой композитной протонообменной мембраны ПВС-СЯК-ВЕА и их сопоставление с параметрами МТЭ с промышленной мембраной МФ-4СК.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

В качестве электрогенных микроорганизмов использовали штамм *Micrococcus luteus* 1-и, выделенный Е.Ю. Коноваловой из активного ила очистных сооружений нефтехимического комбината [13, 14]. Штамм депонирован во Всероссийской коллекции микроорганизмов под номером VKM Ac-2637D. *M. luteus* 1-и выращивали на мясопептонном агаре при 30°C. В экспериментах использовали 1-суточную культуру *M. luteus*. Внесение бактерий в анолит МТЭ осуществляли в виде суспензии, которую готовили путем смыва бактериального налета с поверхности плотной питательной среды физиологическим раствором. Исходный титр клеток в МТЭ составлял $\sim 10^5$ КОЕ/мл.

Ячейка МТЭ, использованных в эксперименте, состояла из двух отсеков – анодного и катодного с размерами 125 × 60 × 55 мм. Стенки камер МТЭ выполнены из оргстекла с толщиной 3 мм (PLEXIGLAS, Rohm Evonik GmbH) (рис. 1).

Для разделения анодной и катодной камер МТЭ использовали разработанную нами протонообменную мембрану из сшитого сульфоянтарной кислотой поливинилового спирта, допированную активированным серной кислотой цеолитом ВЕА (ПВС-СЯК-ВЕА) [12].

Ионную проводимость мембран ПВС-СЯК-ВЕА и МФ-4СК в солевых формах определяли методом импедансной спектроскопии при температуре 30°C и относительной влажности 100% на приборе Z-3000 (Елинс, Россия) двухэлектродным методом. Измерения проводили в частотном диапазоне 300 кГц–1 Гц. Для перевода мембран в солевые формы осуществляли замену подвижных протонов в мембранах на катионы натрия и калия выдерживанием образцов мембран в водно-спиртовых (1 : 1 по объему) 2 М растворах соответствующих щелочей (NaOH, KOH) при 80°C в течение 2 ч с последующим тщательным промыванием дистиллированной водой. Мембраны в Mg²⁺- и Ca²⁺-формах были получены выдержкой в насыщенных растворах нитратов соответствующих металлов в течение 24 ч.

Ионообменную емкость мембран определяли методом обратного титрования согласно [15].

Модуль упругости мембран оценивали в автоматическом режиме на универсальной испытательной машине Shimadzu AGS-X согласно [12].

Характеристики МТЭ на основе предложенной мембраны ПВС-СЯК-ВЕА сопоставляли с аналогичными по конфигурации ячейками с промышленно выпускаемой перфторированной мембраной МФ-4СК (Пластполимер, Россия).

В качестве катода и анода в МТЭ использовали углеродную ткань Урал Т-22Р А (Светлогорск-Химволокно, Республика Беларусь). Площади

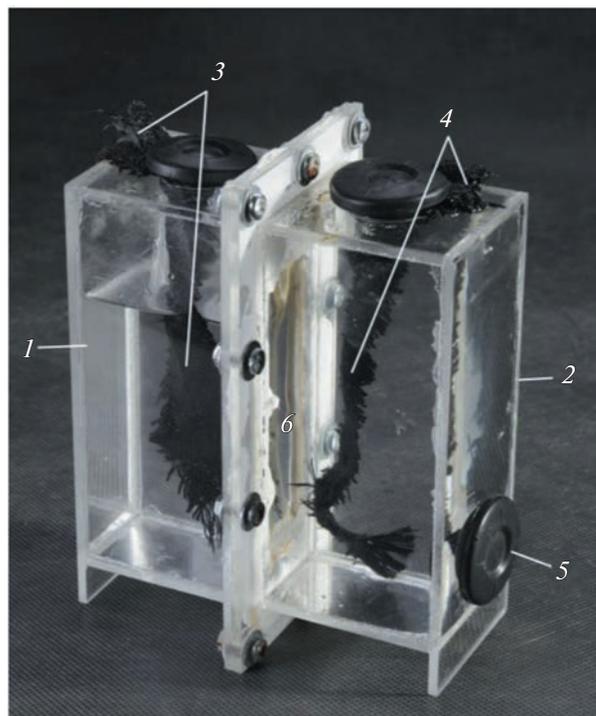


Рис. 1. Конструкция микробного топливного элемента, используемого в работе: 1 – катодная камера; 2 – анодная камера; 3 – катод; 4 – анод; 5 – резиновая заглушка в анодной камере, через которую отбирают пробы и вносят субстраты и биоагенты при помощи шприца; 6 – протонообменная мембрана.

электродов в ячейках составляли 14 см². Культуру микроорганизмов добавляли в анодную камеру, предварительно заполненную рабочим раствором модельной сточной воды (МСВ). Ее состав (мг/л): Na₂CO₃ – 50; KH₂PO₄ – 25; CaCl₂ – 7.5; MgSO₄·7H₂O – 5. Исходный уровень pH модельного раствора составлял 6.5–7.0 ед. Источниками углерода и энергии в анолите являлись различные сахара: глюкоза, арабиноза, галактоза, ксилоза марки “х. ч.”. Указанные соединения вносили в МТЭ в концентрации 0.15 г/л.

Катодный отсек заполняли также МСВ, но без добавления сахаров. Измерения тока и напряжения выполнены мультиметрами DT-266 (КНР), внешнюю нагрузку варьировали от 10 Ом до 100 кОм с помощью магазина сопротивлений MC-6-01/3 Sonel (Toolbox, Russia). Все эксперименты проводили минимум в пяти независимых тестах с тремя параллельными измерениями в каждом. Статистическую обработку экспериментальных данных осуществляли в программах Statistica и Windows Excel. Выводы сделаны при вероятности безошибочного прогноза $P \geq 0.95$.

Таблица 1. Ионная проводимость мембран ПВС-СЯК-ВЕА и МФ-4СК (ОАО Пластполимер) в H^+ -, Na^+ -, K^+ -, Ca^{2+} - и Mg^{2+} -формах

Ионный радиус в водных растворах [22]	Ионная форма мембран	Ионная проводимость, См cm^{-1} (при 303 К)	
		ПВС-СЯК-ВЕА	МФ-4СК
	H^+	5.00×10^{-4}	1.12×10^{-2}
1.74	Na^+	3.89×10^{-5}	2.65×10^{-3}
2.16	K^+	2.25×10^{-5}	2.49×10^{-4}
1.32	Mg^{2+}	7.29×10^{-6}	8.61×10^{-4}
1.62	Ca^{2+}	3.98×10^{-4}	7.58×10^{-4}

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

В работе исследованы физико-химические и электрохимические свойства мембраны на основе сшитого сульфоянтарной кислотой поливинилового спирта, допированной активированным серной кислотой цеолитом ВЕА (ПВС-СЯК-ВЕА) [12]. В качестве сравнительного образца использована коммерческая перфторированная сульфокатионитная мембрана МФ-4СК.

Измерение ионной проводимости мембран ПВС-СЯК-ВЕА и МФ-4СК в H^+ -, Na^+ -, K^+ -, Ca^{2+} - и Mg^{2+} -формах выполнено методом импедансной спектроскопии (табл. 1). Полученные значения ионной проводимости H^+ - и Na^+ -форм мембраны МФ-4СК довольно неплохо согласуются с литературными данными [16]. С увеличением ионного радиуса ионный трансфер перфторированных сульфокатионитных мембран затрудняется, что приводит к уменьшению ионной проводимости [17–21]. Для мембран ПВС-СЯК-ВЕА и МФ-4СК, замещенных однозарядными металлами,

наблюдается снижение ионной проводимости в ~ 2 и 10 раз при переходе от Na^+ к K^+ соответственно. Замещенная двухзарядными ионами металлов (Mg^{2+} и Ca^{2+}) мембрана МФ-4СК обладает в 3 раза большей проводимостью по сравнению с K^+ , а при переходе от Mg^{2+} к Ca^{2+} незначительно уменьшается. В противоположность мембране МФ-4СК, ионная проводимость мембраны ПВС-СЯК-ВЕА увеличивается в ~ 55 раз с увеличением ионного радиуса при переходе к двухзарядным ионам. Данное наблюдение может быть объяснено наличием в составе мембраны ПВС-СЯК-ВЕА цеолита ВЕА, размер каналов внутри кристаллической структуры которого благоприятен для транспорта катионов Ca^{2+} .

Введение цеолита в мембрану ПВС-СЯК-ВЕА привело к значительному повышению ионообменной емкости и механической прочности по сравнению с мембраной МФ-4СК. Так, модуль упругости мембраны ПВС-СЯК-ВЕА составил 190 МПа, ионообменная емкость – 2.4 мг-экв./г, в то время как для МФ-4СК эти параметры были равны 160 МПа и 0.89 мг-экв./г соответственно.

Для изучения влияния различных субстратов на электрические характеристики МТЭ с новыми ионообменными мембранами анализировали вольт-амперные и мощностные характеристики МТЭ с различными моносахаридами в анодной камере. Измерения проводили каждые 2–3 сут в течение 14 сут эксперимента. Ниже приведены данные, демонстрирующие эффективность работы МТЭ на 1-е и 14-е сут от начала эксперимента. В качестве сравнительного образца использовали МТЭ с промышленной мембраной МФ-4СК.

Оценка электрохимических параметров МТЭ с мембраной ПВС-СЯК-ВЕА показала следующее. В первые сутки эксперимента наибольшими значениями мощности характеризовались МТЭ с гексозами – глюкозой и галактозой. В этом случае удельная мощность МТЭ с этими сахарами и штаммом *Micrococcus luteus* 1-и достигала 58 и 51 мВт/м² соответственно (рис. 2). В МТЭ с пен-

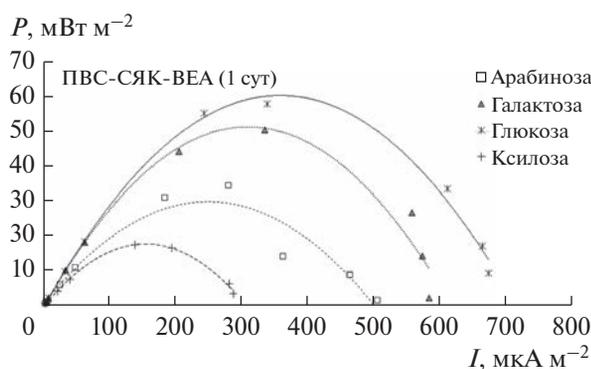


Рис. 2. Электрохимические характеристики МТЭ с мембраной из поливинилового спирта, сшитого сульфоянтарной кислотой (ПВС-СЯК-ВЕА), на основе штамма *Micrococcus luteus* 1-и и различных сахаров на 1-е сут эксперимента (анолит – модельная сточная вода, концентрация сахаров – 0.15 г/л).

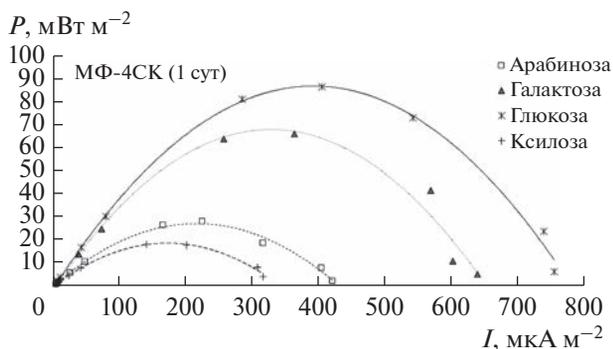


Рис. 3. Электрохимические характеристики МТЭ с мембраной МФ-4СК на основе штамма *Micrococcus luteus* 1-и и различных сахаров на 1-е сут эксперимента (анолит – модельная сточная вода, концентрация сахаров – 0.15 г/л).

тозами арабинозой и ксилозой этот показатель был ниже и составлял только 34 и 18 мВт/м² соответственно.

В МТЭ с мембраной МФ-4СК соотношения электрических параметров в зависимости от типа углеводных субстратов были довольно схожи с теми, что получены при использовании мембраны ПВС-СЯК-ВЕА. Условный ряд испытанных сахаров по величине напряжения, генерируемого в МТЭ штаммом *M. luteus* 1-и при использовании этих сахаров, выглядит следующим образом (в порядке убывания величин напряжения и тока): глюкоза > галактоза > арабиноза > ксилоза. Последовательность сахаров в этом ряду аналогична той, что получена при использовании мембраны ПВС-СЯК-ВЕА (рис. 3).

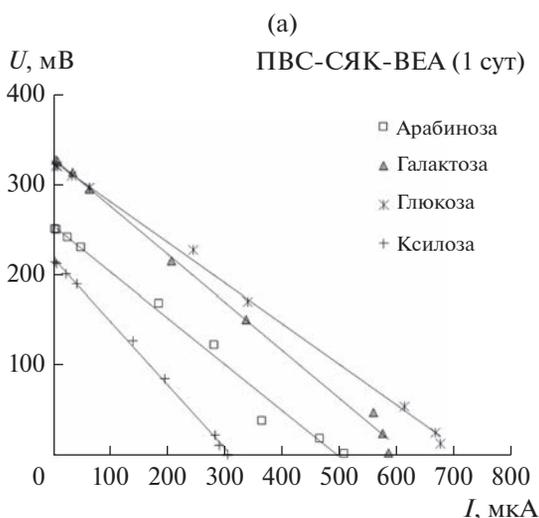


Рисунок 4 описывает зависимость напряжения и силы тока, генерируемых в указанных МТЭ с мембранами ПВС-СЯК-ВЕА (рис. 4а) и МФ-4СК (рис. 4б) за 1 сут экспонирования.

На 14-е сут эксперимента электрохимические показатели существенно выросли у всех типов МТЭ. В опытах с мембраной ПВС-СЯК-ВЕА наибольшими значениями так же, как и на 1-е сут, отличались МТЭ с добавлением глюкозы. Удельная мощность в этом случае достигала 130 мВт/м². При внесении галактозы *M. luteus* 1-и генерировал мощность 92 мВт/м², арабинозы – 47 мВт/м². МТЭ с ксилозой характеризовались значительно более низкими электрическими параметрами (рис. 5).

В МТЭ с мембраной МФ-4СК наиболее высокие электрические показатели были характерны при использовании в качестве субстрата для *M. luteus* 1-и галактозы. В этом случае удельная мощность достигала 140 мВт/м². В МТЭ, содержащих глюкозу, исследуемый показатель составлял 84, арабинозу – 66, а ксилозу – 42 мВт/м² (рис. 6).

Описываемую тенденцию наглядно показывают и вольт-амперные характеристики исследуемых МТЭ (рис. 7).

Генерирование электрического тока в МТЭ сопровождалось снижением содержания сахаров в анолите под действием *M. luteus*. Например, концентрация глюкозы за первые 3 сут экспонирования понижалась ~ в 3.5 раза, к 14-м сут – в 4 раза от исходного (рис. 8).

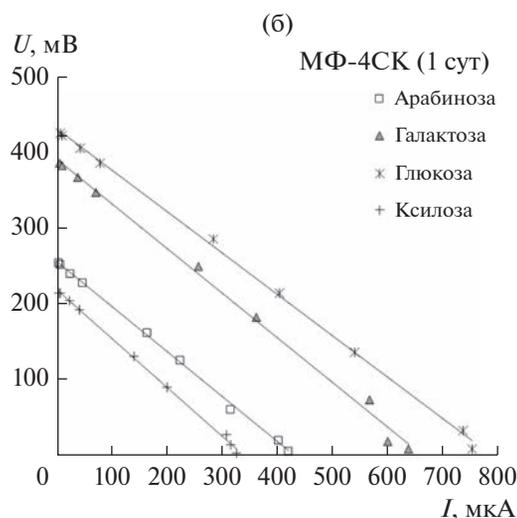


Рис. 4. Вольт-амперные характеристики МТЭ с мембраной из поливинилового спирта, сшитого сульфоянтарной кислотой (ПВС-СЯК-ВЕА) (а) и МФ-4СК (б) на основе штамма *Micrococcus luteus* 1-и и различных сахаров на 1-е сут эксперимента (анолит – модельная сточная вода, концентрация сахаров – 0.15 г/л).

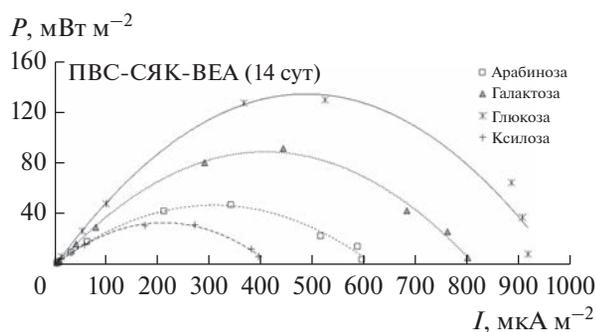


Рис. 5. Электрохимические характеристики МТЭ с мембраной из поливинилового спирта, сшитого сульфоянтарной кислотой (ПВС-СЯК-ВЕА), на основе штамма *Micrococcus luteus* 1-и и различных сахаров на 14-е сут эксперимента (анолит – модельная сточная вода, концентрация сахаров – 0.15 г/л).

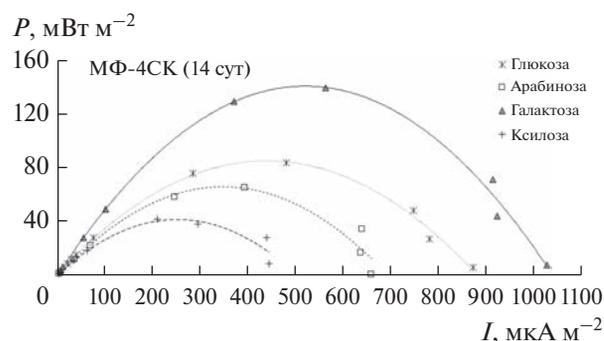


Рис. 6. Электрохимические характеристики МТЭ с мембраной МФ-4СК на основе штамма *Micrococcus luteus* 1-и и различных сахаров на 14-е сут эксперимента (анолит – модельная сточная вода, концентрация сахаров – 0.15 г/л).

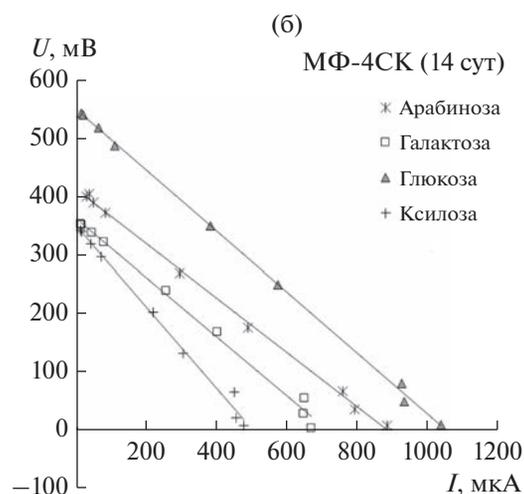
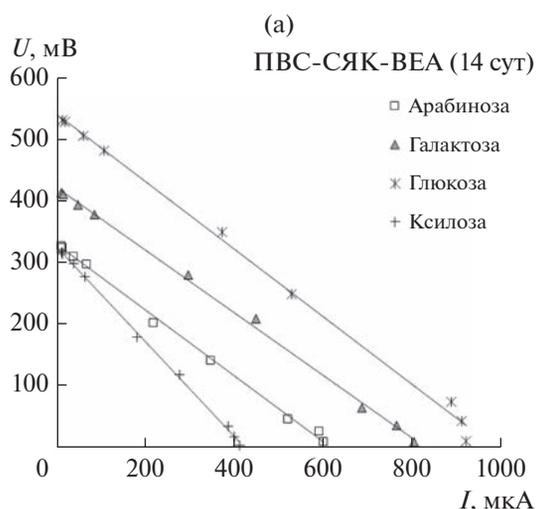


Рис. 7. Вольт-амперные характеристики МТЭ с мембраной из поливинилового спирта, сшитого сульфоянтарной кислотой (ПВС-СЯК-ВЕА) (а) и МФ-4СК (б) на основе штамма *Micrococcus luteus* 1-и и различных сахаров на 14-е сут эксперимента (анолит – модельная сточная вода, концентрация сахаров – 0.15 г/л).

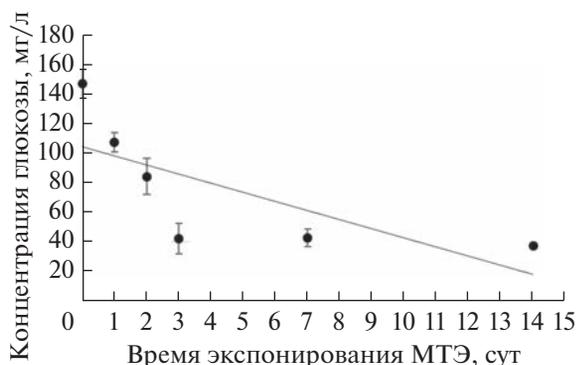


Рис. 8. Изменение концентрации глюкозы в анолите МТЭ под действием штамма *Micrococcus luteus* 1-и.

Таким образом, полученные результаты продемонстрировали способность штамма *M. luteus* 1-и к окислению в МТЭ ряда сахаров (глюкоза, арабиноза, галактоза, ксилоза) с одновременным генерированием электрического тока. Ранее была показана электрогенная активность этого микроорганизма в МТЭ при утилизации белка [23], аспарагиновой и глутаминовой аминокислот [14].

О способности давать ток в МТЭ при использовании таких субстратов, как глюкоза, галактоза, бактериями этого же вида, но другим штаммом *M. luteus* (КССМ 40166, IFO 3066) сообщали в работе [24]. В исследованиях этих авторов максимальные значения отмечали при добавлении глюкозы (0.025 mA cm^{-2}).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Сопоставление эффективности работы МТЭ, изготовленных на основе двух типов мембран, с использованием электрогенного штамма *M. luteus* 1-и и различных сахаров выявило, что характеристики топливного элемента в значительной степени зависели от используемых источников углерода и энергии для микроорганизмов. Более высокий выход электричества отмечали при добавлении глюкозы, галактозы, а наименьший – при использовании ксилитозы. Сравнение МТЭ с мембранами на основе сшитого сульфоянтарной кислотой поливинилового спирта, допированного цеолитом ВЕА (ПВС-СЯК-ВЕА) и МФ-4СК, показало довольно неплохую схожесть характеристик для всех типов исследуемых субстратов. Полученные результаты оценки работы МТЭ на основе предложенной нами мембраны ПВС-СЯК-ВЕА были практически сопоставимы с аналогичными МТЭ на основе промышленной протонообменной мембраны МФ-4СК. Это свидетельствует о перспективности применения предложенной мембраны в качестве альтернативы широко используемому в технологии топливных элементов дорогостоящим коммерческим мембранам.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы благодарят к.х.н., доцента ИРНТУ С.А. Скорникову – за предоставление образцов цеолитов, Е.Ю. Коновалову – штамма *M. luteus* 1-и.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ в рамках научно-образовательного центра “Байкал” (грант № FZZS-2021-0007) и Российского Фонда фундаментальных исследований (проект № 21-54-12022).

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Ramya, M. and Kumar, P.S., A review on recent advancements in bioenergy production using microbial fuel cells, *Chemosphere*, 2022, vol. 288, part 2, 132512. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.132512>
- Wilberforce, T., Abdelkareem, M.A., Elsaid, K., Olabi, A.G., and Sayed, E.T., Role of carbon-based nanomaterials in improving the performance of microbial fuel cells, *Energy*, 2022, vol. 240, 122478. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.122478>
- Boas, J.V., Oliveira, V.B., Simões, M., and Pinto, A.M.F.R., Review on microbial fuel cells applications, developments and costs, *J. Environmental Management*, 2022, vol. 307, 114525. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2022.114525>
- Mohyudin, S., Farooq, R., Jubeen, F., Rasheed, T., Fatima, M., and Sher, F., Microbial fuel cells a state-of-the-art technology for wastewater treatment and bioelectricity generation, *Environmental Res.*, 2022, vol. 204, part D, 112387. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2021.112387>
- Liu, L., Zhou, X., Wang, Y., Li, S., Yin, R., Ji, X., Zhao, X., and Li, B., Study of high active and redox-stable La_{0.9}Ca_{0.1}Fe_{0.9}Nb_{0.1}O_{3-δ}/Sm_{0.1}Ce_{0.9}O_{2-δ} composite ceramic electrode for solid oxide reversible cells, *Electrochim. Acta*, 2017, vol. 236, p. 371. <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2017.03.195>
- Moon, J.M., Kondaveeti, S., and Min, B., Evaluation of low-cost separators for increased power generation in single chamber microbial fuel cells with membrane electrode assembly, *Fuel Cells*, 2015, vol. 15, no. 1, p. 230. <https://doi.org/10.1002/fuce.201400036>
- Hendrana, S., Chaldun, E.R., Pudjiastuti, S., Rahayu, I., Natanael, C.L., Oktaverina, D., and Semboor, M.S., Heterogeneous sulphonation of polystyrene for polymer electrolyte membrane fuel cell application, *Macromolec. Symp.*, 2013, vol. 327, vol. 1, p. 80. <https://doi.org/10.1002/masy.201350509>
- Bai, Z., Durstock, M.F., and Dang, T.D., Proton conductivity and properties of sulfonated polyaryleneethioether sulfones as proton exchange membranes in fuel cells, *J. Membr. Sci.*, 2006, vol. 281, no. 1–2, p. 508. <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2006.04.021>
- Umar, M.F., Rafatullah, M., Abbas, S.Z., Mohamad, I.M.N., and Ismail, N., Advancement in Benthic Microbial Fuel Cells toward Sustainable Bioremediation and Renewable Energy Production, *Internat. J. Environmental Res. and Publ. Health*, 2021, vol. 18(7), 3811. <https://doi.org/10.3390/ijerph18073811>
- Wang, H., Chen, P., Zhang, Sh., Jiang, J., Hua, T., and Li, F., Degradation of pyrene using single-chamber air-cathode microbial fuel cells: Electrochemical parameters and bacterial community changes, *Sci. Total Environment*, 2022, vol. 804, 150153. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.150153>
- Dai, Q., Zhang, S., Liu, H., Huang, J., and Li, L., Sulfide-mediated azo dye degradation and microbial community analysis in a single-chamber air cathode microbial fuel cell, *Bioelectrochem.*, 2020, vol. 131, 107349. <https://doi.org/10.1016/j.bioelechem.2019.107349>
- Chesnokova, A.N., Zhamsaranzhapova, T.D., Zarkarchevskiy, S.A., Kulshrestha, V., Skornikova, S.A., Makarov, S.S., and Pozhidaev, Yu.N., Effect of zeolite content on proton conductivity and technical characteristics of the membranes based on crosslinked polyvinyl alcohol, *Izvestiya Vuzov. Prikladnaya Khimiya i Biotekhnologiya = Proceedings of Universities. Appl. Chem. and Biotechnol.*, 2020, vol. 10, no. 2, p. 360. (In Russian) <https://doi.org/10.21285/2227-2925-2020-10-2-360-367>
- Stom, D.I., Konvalova, E.Yu., Zhdanova, G.O., Tolstoy, M.Yu., and Vyatchina, O.F., Active sludge and strains isolated from it as bioagents in biofuel cells / 17th

- Internat. Multidisciplinary Scientific Geoconference SGEM 2017, Conf. proc.*, 2017, vol. 17, Issue 42, p. 19.
<https://doi.org/10.5593/sgem2017/42/S17.003>
14. Kuznetsov, A.V., Khorina, N.N., Konovalova, E.Yu., Amsheev, D.Yu., Ponamoreva, O.N., and Stom, D.I., Bioelectrochemical processes of oxidation of dicarboxylic amino acids by strain *Micrococcus luteus* 1-I in a biofuel cell, *IOP Conf. Ser.: Earth and Environmental Sci.*, 2021, vol. 808, 012038.
<https://doi.org/10.1088/1755-1315/808/1/012038>
 15. Lebedeva, O.V., Pozhidaev, Yu.N., Malakhova, E.A., Raskulova, T.V., Chesnokova, A.N., Kulshrestha, V., et al., Sodium p-styrene sulfonate-1-vinylimidazole copolymers for acid-base proton-exchange membranes, *Membr. and Membr. Technol.*, 2020, vol. 2, p. 76.
<https://doi.org/10.1134/S2517751620020079>
 16. Volkov, V.I., Pavlov, A.A., and Sanginov, E.A., Ionic transport mechanism in cation-exchange membranes studied by NMR technique, *Solid State Ionics*, 2011, vol. 188(1), p. 124.
 17. Stenina, I.A. and Yaroslavl'tsev, A.B., Ionic Mobility in Ion-Exchange Membranes, *Membranes*, 2021, vol. 11, 198.
<https://doi.org/10.3390/membranes11030198>
 18. Yaroslavl'tsev, A.B., Solid electrolytes: Main prospects of research and development, *Russ. Chem. Rev.*, 2016, vol. 85, p. 1255.
<https://doi.org/10.1070/RCR4634>
 19. Peng, J., Tian, M., Cantillo, N.M., and Zawodzinski, T., The ion and water transport properties of K^+ and Na^+ form perfluorosulfonic acid polymer, *Electrochim. Acta*, 2018, vol. 282, p. 544.
<https://doi.org/10.1016/j.electacta.2018.06.035>
 20. Shi, S., Weber, A.Z., and Kusoglu, A., Structure-transport relationship of perfluorosulfonic-acid membranes in different cationic forms, *Electrochim. Acta*, 2016, vol. 220, p. 517.
<https://doi.org/10.1016/j.electacta.2016.10.096>
 21. Okada, T., Xie, G., Gorseth, O., Kjelstrup, S., Nakamura, N., and Arimura, T., Ion and water transport characteristics of Nafion membranes as electrolytes, *Electrochim. Acta*, 1998, vol. 43, p. 3741.
[https://doi.org/10.1016/S0013-4686\(98\)00132-7](https://doi.org/10.1016/S0013-4686(98)00132-7)
 22. Heyrovská, R., Dependence of ion-water distances on covalent radii, ionic radii in water and distances of oxygen and hydrogen of water from ion/water boundaries, *Chem. Phys. Lett.*, 2006, 429, p. 600.
 23. Konovalova, E.Yu., Barbora, L., Chizhik, K.I., and Stom, D.I., *Micrococcus luteus* and *Serratia marcescens*, as a new association of bio-agents for microbial fuel cells, *IOP Conf. Ser.: Earth and Environmental Sci.*, 2020, vol. 408, 012080.
<https://doi.org/10.1088/1755-1315/408/1/012080>
 24. Choi, Y., Jung, E., Park, H., Jung, S., and Kim S., Effect of Initial Carbon Sources on the Performance of a Microbial Fuel Cell Containing Environmental Microorganism *Micrococcus luteus*, *Korean Chem. Soc.*, 2007, vol. 28, no. 9, p. 1591.