

УДК 579.695+504.064.45+57.044+66.098.4

ВЛИЯНИЕ ПАВ НА ФУНКЦИОНИРОВАНИЕ ШТАММА *MICROCOCCUS LUTEUS* 1-И В БИОТОПЛИВНЫХ ЭЛЕМЕНТАХ

© 2024 г. Д. И. Стом^{a, b, c, *}, И. А. Топчий^d, Г. О. Жданова^d, П. С. Сташкевич^d,
К. А. Храмцова^d, Ю. Ю. Петрова^a, Р. В. Лепикаш^e, А. Б. Купчинский^b

^aСургутский государственный университет, Сургут, Россия

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

^cИркутский национальный исследовательский технический университет, Иркутск, Россия

^dИркутский государственный университет, Иркутск, Россия

^eТульский государственный университет, Тула, Россия

*e-mail: stomd@mail.ru

Поступила в редакцию 13.05.2024 г.

После доработки 14.08.2024 г.

Принята к публикации 15.08.2024 г.

Проанализирована работа биотопливных элементов (БТЭ) на основе штамма *Micrococcus luteus* 1-и при действии основных представителей различных групп поверхностно-активных веществ (ПАВ). Были испытаны цетилтриметиламмония бромид (катионоактивное ПАВ), твина-80 (неионогенное ПАВ), лаурилсульфат натрия (анионоактивное ПАВ). Показано, что цетилтриметиламмония бромид понижал электрические характеристики БТЭ в концентрациях от 10 мг/л, твин-80 — от 5 мл/л, лаурилсульфат натрия — от 100 мг/л. Сопоставление электрогенной активности бактерий в БТЭ с их жизнеспособностью и кинетикой окислительно-восстановительного потенциала анолита позволило сделать вывод, что снижение эффективности работы исследуемых БТЭ при действии ПАВ в испытанных диапазонах концентраций связано с их токсическим действием на микробные клетки.

Ключевые слова: биотопливный элемент, *Micrococcus luteus*, поверхностно-активные вещества, генерирование электрического тока

DOI: 10.31857/S0424857024090041, EDN: OHYWVG

INFLUENCE OF SURFACTANTS ON THE FUNCTIONING OF *MICROCOCCUS LUTEUS* 1-I STRAIN IN BIOFUEL CELLS

D. I. Stom^{a, b, c, *}, I. A. Topchiy^d, G. O. Zhdanova^d, P. S. Stashkevich^d, K. A. Khramtsova^d,
Yu. Yu. Petrova^a, R. V. Lepikash^e, A. B. Kupchinsky^b

^aSurgut State University, Surgut, Russia

^bBaikal Museum of the SB RAS, Listvyanka, Irkutsk region, Russia

^cIrkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia

^dIrkutsk State University, Irkutsk, Russia

^eTula State University, Tula, Russia

*e-mail: stomd@mail.ru

Received May 13, 2024; revised August 14, 2024; accepted August 15, 2024

The operation of biofuel cells (BFC) based on the *Micrococcus luteus* 1-i strain under the action of the main representatives of various groups of surfactants has been analyzed. The following were tested: cetyltrimethylammonium bromide (cationic surfactant), Tween-80 (non-ionic surfactant), sodium lauryl sulfate (anionic surfactant). It was shown that cetyltrimethylammonium bromide reduced the electrical characteristics of BFC at concentrations of 10 mg/l, Tween-80 — from 5 ml/l, sodium lauryl sulfate — from 100 mg/l. A comparison of the electrogenic activity of bacteria in BFCs with their viability and the

kinetics of the redox potential of the anolyte allowed us to conclude that the decrease in the efficiency of the studied BFCs under the influence of surfactants in the tested concentration ranges is associated with their toxic effect on microbial cells.

Keywords: biofuel cell, *Micrococcus luteus*, surfactants, electric current generation

ВВЕДЕНИЕ

Одними из наиболее распространенных компонентов хозяйственно-бытовых, фекальных и производственных сточных вод являются поверхностно-активные вещества (ПАВ) [1]. В определенных концентрациях присутствие в сточных водах таких активных в физико-химическом плане соединений, обладающих высокой способностью проникать через клеточные барьеры, в принципе должно оказывать влияние на микроорганизмы-электрогены в биотопливных элементах (БТЭ).

В зависимости от химической природы, ПАВ подразделяют на четыре основных класса: анионные (гидрофильная группа несет отрицательный заряд); катионные (гидрофильная группа несет положительный заряд); цвиттер-ионные (гидрофильная группа имеет группировки, позволяющие молекуле иметь как положительный, так и отрицательный заряд) и неионогенные (гидрофильная группа не несет заряда) [2]. Разность их химической природы обуславливает различный механизм взаимодействия с микробными клетками и, соответственно, различную степень опасности для организмов, в том числе и для микроорганизмов-биодеструкторов [3].

Ранее проведенные исследования продемонстрировали перспективность применения в БТЭ бактерий *Micrococcus luteus* [4]. Нами также был выделен (источник выделения — активный ил нефтеперерабатывающего предприятия в г. Ангарск, Россия) электрогенный штамм *M. luteus* 1-и. Изучены электрохимические параметры БТЭ на основе этого штамма в процессах утилизации дикарбоновых кислот, углеводов, модельных сточных вод [5–7].

В данной работе оценивали влияние на эффективность работы бактериального штамма *M. luteus* 1-и в БТЭ основных представителей групп ПАВ — цетилтриметиламмония бромид (катионоактивный ПАВ), твина-80 (неионогенный ПАВ), лаурилсульфата натрия (анионоактивный ПАВ).

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Объект исследования — бактериальный штамм *M. luteus* 1-и. Он выделен из активного ила очистных сооружений нефтеперерабатывающего предприятия (г. Ангарск, Россия) и депонирован во Всероссийской коллекции микроорганизмов под номером ВКМ Ас-2637D. Культивирование бактерий и наращивание их биомассы для экспериментов с БТЭ осуществляли на мясопептонном агаре (состав среды, г/л: пептон ферментативный — 10.0; мясной экстракт — 11.0 ± 1.0 ; натрия хлорид — 5.0; агар микробиологический — 15.0 ± 3.0). Оптимальная для роста штамма температура — $+30\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Электрогенную активность испытуемого бактериального штамма оценивали в двухкамерных БТЭ [8, 9]. В качестве материала для их изготовления использовали оргстекло Plexiglas толщиной 3 мм. Две прямоугольные камеры (каждая объемом 400 мл) сообщались друг с другом через прямоугольные отверстия (размером 40×120 мм) в боковой части каждой из камер, в которых фиксировали протонообменную мембрану “МФ-4СК” (Пластполимер, Россия). В верхней крышке каждой из камер имелись отверстия (диаметром 24 мм) для размещения рабочих электродов — углеродной ткани “Урал Т-22Р А” (Светлогорскхимволокно, Беларусь). В катодной камере также располагалось дополнительное отверстие для аэрации католита. Анодную камеру закупоривали полностью, для обеспечения анаэробных условий анолита (рис. 1).

Католитом служил водный раствор следующего состава (мг/л): Na_2CO_3 — 50.0; KH_2PO_4 — 25.0; CaCl_2 — 7.5; $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ — 5.0. Это модифицированный состав модельной сточной воды (ГОСТ Р 50595-93). Анолит имел аналогичный состав, но с добавлением органического субстрата — пептона (500 мг/л). Он служил источником углерода и энергии для *M. luteus* 1-и. При изучении действия ПАВ на электрогенную активность бактерий в БТЭ, в анолит добавляли растворы ПАВ в определенных концентрациях. Электрические взаимодействия играют важнейшую роль в процессах сорбции микробных

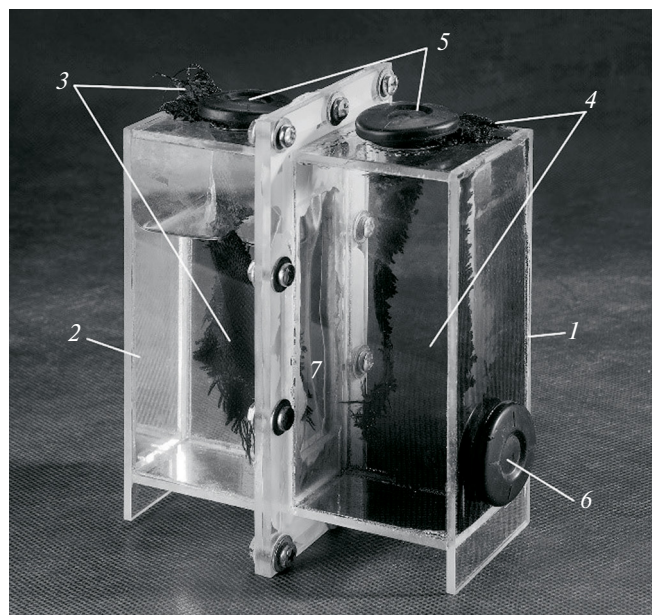
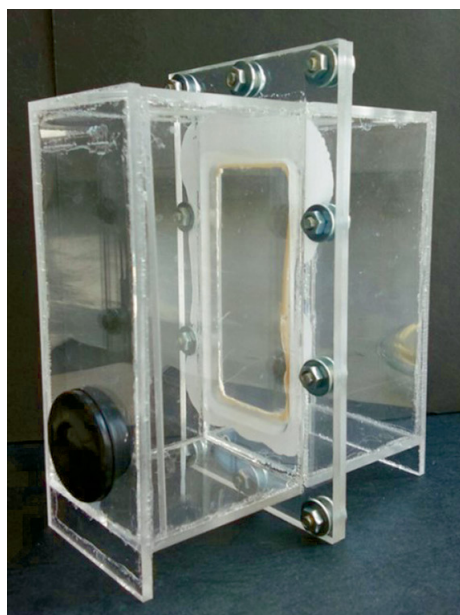


Рис. 1. Используемый в работе двухкамерный БТЭ [9]: 1 – анодная камера; 2 – катодная камера; 3 – катодный электрод; 4 – анодный электрод; 5 – резиновые крышки, закрывающие и фиксирующие электроды; 6 – резиновая заглушка в анодной камере, через которую отбирают пробы и вносят субстраты и биоагенты при помощи шприца; 7 – протоннообменная мембрана МФ-4СК.



клеток на электродах БТЭ при генерировании ими электрического тока. Это обусловило выбор в данной работе детергентов с разной степенью заряженности – положительно заряженный цетилтриметиламмония бромид (представитель катионоактивных ПАВ), отрицательно заряженный лаурилсульфат натрия (представитель анионоактивных ПАВ) и ПАВ с нейтральным зарядом твин-80 (представитель неионогенных ПАВ). Эти соединения нередко используются в качестве типичных представителей разных классов ПАВ при изучении их роли в различных химических и биологических процессах (табл. 1).

Перед началом работы обе камеры БТЭ стерилизовали 3%-ным раствором перекиси водорода в течение 20 мин. После этого каждый отсек БТЭ тщательно промывали стерильной водой, чтобы удалить остатки H_2O_2 . Далее БТЭ помещали под ультрафиолетовую лампу (МЕД-1, Россия) на 15 мин. После этого с соблюдением всех правил асептики камеры БТЭ заполняли электролитом. Анодную ячейку заполняли полностью до самого верха, а катодную – на 2–3 см ниже верхнего уровня отсека. Это позволяло минимизировать присутствие кислорода воздуха в анолите путем вытеснения его жидкостью, а католит – напротив, аэрировать. Через специальные отверстия в верхней части камер в БТЭ размещали анодный и катодный электроды, которые фиксировали резиновыми пробками, плотно прилегающими

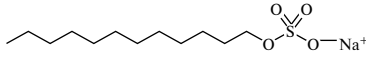
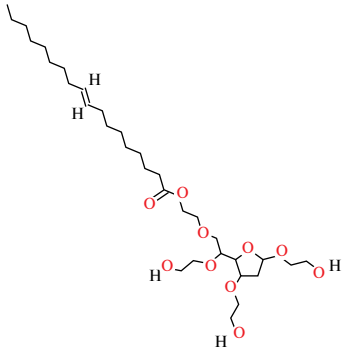
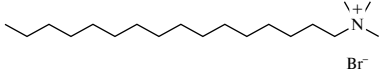
к крышке. Биоагент (*M. luteus* 1-и) и субстрат (пептон) вносили при помощи стерильного шприца через специальную резиновую заглушку в боковой части анодной камеры.

Регистрацию силы тока и напряжения проводили с использованием цифрового мультиметра Fluke 17B (Fluke, Китай) и магазина сопротивлений ПрофКиП Р33 (ПрофКиП, Россия).

Численность клеток микроорганизмов препарата в БТЭ оценивали методом Коха [10]. Отбор проб анолита производили при помощи стерильного шприца через специальную резиновую заглушку в боковой части анодной камеры. Инкубирование бактерий осуществляли на рыбо-пептонном агаре в течение 2 сут. Окислительно-восстановительный потенциал анолита оценивали при помощи анализатора жидкости Эксперт-001-3.0.1 (Эконикс-Эксперт, Россия) с комбинированным редокс-электродом ЭРП-105 (Измерительная техника, Россия).

Для статистической обработки полученных данных применяли пакет программ Microsoft Excel. На графиках приведены значения среднего арифметического и стандартное отклонение среднего арифметического (или средняя квадратичная ошибка). Достоверность различия результатов определяли с помощью критерия Стьюдента. Выводы сделаны с вероятностью безошибочного прогноза $P \geq 0.95$.

Таблица 1. Основные характеристики используемых в работе поверхностно-активных веществ

ПАВ, его характеристика	Структурная формула	Концентрации, используемые в работе
Лаурилсульфат натрия (додецилсульфат натрия) (х. ч.). $C_{12}H_{25}SO_4Na$, натриевая соль лаурилсерной кислоты. Анионоактивное ПАВ		50 мг/л 100 мг/л 500 мг/л 1000 мг/л
Твин-80 (полисорбат 80) (имп.). $C_{64}H_{126}O_{124}$, полиоксиэтилен, полученный из сорби- тана и олеиновой кислоты. Неионогенное ПАВ		5 мл/л 10 мл/л 30 мл/л 50 мл/л
Цетилтриметиламмония бромид (СТАВ) (имп.). $C_{19}H_{42}BrN$, относится к четвертичным аммониевым соединениям. Катионоактивное ПАВ		10 мг/л 50 мг/л 100 мг/л 500 мг/л

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

В экспериментах были найдены концентрации ПАВ, понижающие эффективность БТЭ при воздействии на работу анодного биокатализатора – штамма *M. luteus*. Цетилтриметиламмония бромид (СТАВ) приводил к уменьшению электрических характеристик БТЭ в концентрациях от 10 мг/л (рис. 2, 3), твин-80 – от 5 мл/л (рис. 4, 5), лаурилсульфат натрия (SLS) – от 100 мг/л (рис. 6, 7).

Максимальная мощность, генерируемая в исследуемых БТЭ штаммом *M. luteus*, развивалась при его работе на внешнюю нагрузку 1 кОм. В отсутствие ПАВ этот показатель на 5 сут экспонирования составлял 0.014 мВт. При внесении в анолит БТЭ 10 и 50 мг/л СТАВ значение максимальной мощности было значительно ниже – 0.003 мВт. Дальнейшее повышение содержания СТАВ в анолите БТЭ практически полностью ингибировало процесс электрогенерации (рис. 3).

Скачки электрических характеристик при работе БТЭ на внешнюю нагрузку в 0.5–10 кОм,

наблюдаемые при изменении концентрации ПАВ в растворах в диапазоне 50–500 мг/л (см. рис. 3), по нашему мнению, могут быть связаны с особенностями действия молекул ПАВ на поверхность. Известно, что при действии ПАВ на различные поверхности чаще всего наблюдается двухстадийный эффект: на первом этапе детергенты садятся на гидрофобную поверхность гидрофобным участком молекулы, а гидрофильная ее часть остается свободной. В результате этого после заполнения поверхности одним слоем детергента поверхность становится более гидрофильной за счет “торчащих” наружу гидрофильных “концов” молекул ПАВ. При дальнейшем повышении концентрации ПАВ в растворе на испытываемой поверхности может формироваться второй слой этих веществ. Но в этом случае молекулы детергента присоединяются уже гидрофильным участком к таким же свободным гидрофильным участкам молекул ПАВ первого слоя. Соответственно, на этот раз свободными остаются гидрофобные участки молекул, снова повышая гидрофобность обрабатываемой поверхности [11]. После изменения

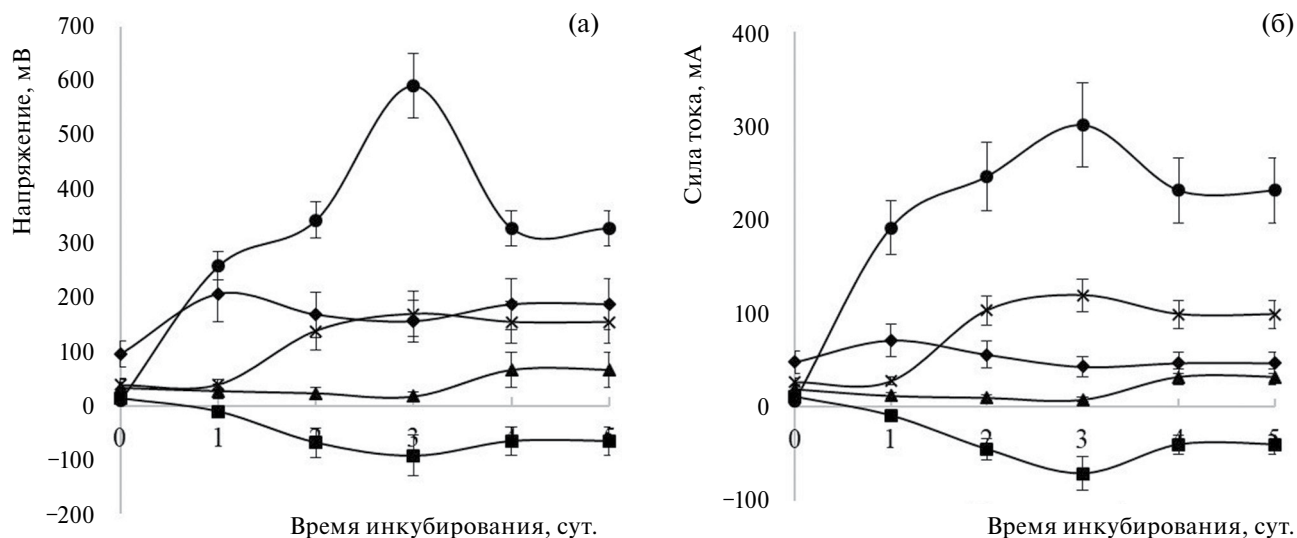


Рис. 2. Влияние катионоактивного ПАВ цетилтриметиламмония бромида на динамику напряжения (измерено в режиме разомкнутой цепи) (а) и силу тока (б) (измерено в режиме короткого замыкания), генерируемого в БТЭ штаммом *M. luteus* 1-и (анолит – модельная сточная вода (субстрат – пептон 500 мг/л), электроды – углеродная ткань); ● – контроль (без ПАВ); × – СТАВ 10 мг/л; ▲ – СТАВ 50 мг/л; ■ – СТАВ 100 мг/л; ◆ – СТАВ 500 мг/л.

характера поверхности меняются и условия взаимодействия с ней клеток. А это в свою очередь может значительно влиять на электрогенез в БТЭ.

Неионогенный ПАВ твин-80 снижал показатели напряжения (рис. 4а), силы тока (рис. 4б) и мощности (рис. 5), генерируемые в БТЭ штаммом *M. luteus*, при содержании от 5 мл/л. Однако следует отметить, что концентрационной зависимости электрогенной активности штамма в БТЭ выявить не удалось.

Понижение энергоэффективности БТЭ в присутствии твина-80 наиболее наглядно видно при расчете мощности испытуемых биоэлектрохимических систем, произведенной при измерении характеристик БТЭ при его работе на внешнюю нагрузку (рис. 5).

Более детально оценено влияние анионоактивного ПАВ SLS на электрогенную активность *M. luteus* в БТЭ. Уменьшение электрических показателей БТЭ происходило в присутствии 100 мг/л этого ПАВ и выше. Так, при добавлении 50 мг/л SLS напряжение разомкнутой цепи (рис. 6а) и сила тока короткого замыкания (рис. 6б) соответствовали таковым в контрольном опыте (т.е., без добавления ПАВ). При концентрации 100 мг/л электрические показатели были ниже, чем в контрольном варианте. За 60 ч экспонирования контрольный БТЭ генерировал напряжение до 480 мВ, силу тока до 634 мкА,

а БТЭ, содержащий в анолите 100 мг/л SLS, – 291 мВ и 349 мкА соответственно. ПАВ в содержании 1000 мг/л блокировал процесс генерирования электрического тока (рис. 6).

Результаты оценки жизнеспособности микроорганизмов в исследуемых БТЭ демонстрируют взаимосвязь снижения электрогенной активности под действием ПАВ с ингибированием роста культуры и при определенных концентрациях загрязнителя – ее гибелью. Так, при добавлении 100 мг/л SLS количество

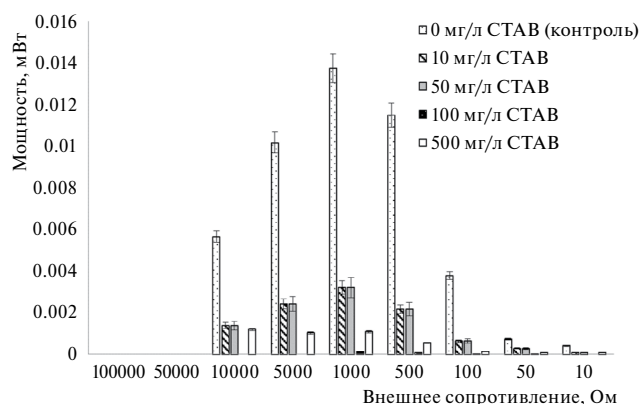


Рис. 3. Влияние катионоактивного ПАВ цетилтриметиламмония бромида на мощность исследуемых БТЭ при их работе на внешнюю нагрузку (Ω) от 10 Ом до 100 кОм (анодный биокатализатор – штамм *M. luteus* 1-и; анолит – модельная сточная вода (субстрат – пептон 500 мг/л), электроды – углеродная ткань).

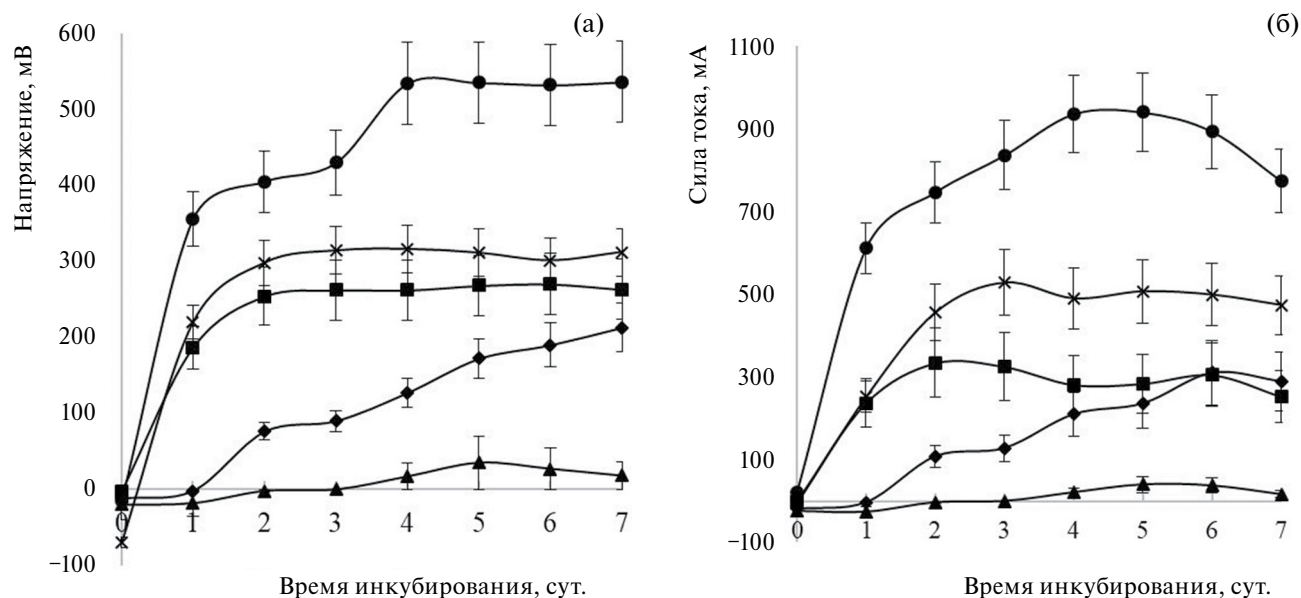


Рис. 4. Влияние неионогенного ПАВ твина-80 на динамику напряжения (измерено в режиме разомкнутой цепи) (а) и силу тока (б) (измерено в режиме короткого замыкания), генерируемого в БТЭ штаммом *M. luteus* 1-и (анолит – модельная сточная вода (субстрат – пептон 500 мг/л), электроды – углеродная ткань); ● – контроль (без ПАВ); × – твин-80 5 мл/л; ▲ – твин-80 10 мл/л; ■ – твин-80 30 мл/л; ◆ – твин-80 50 мл/л.

жизнеспособных клеток за 2 сут инкубирования увеличивалось менее значительно (в 2 раза от исходного) по сравнению с контрольным вариантом (с $4.39 \cdot 10^5$ до $61.8 \cdot 10^5$ КОЕ/мл, т.е. в 14 раз от исходного). Повышение концентрации SLS до 500 мг/л приводило к сокращению количества жизнеспособных клеток – с $4.39 \cdot 10^5$ (исходное количество) до $9.5 \cdot 10^4$ КОЕ/мл (на 2 сут инкубирования). При 1000 мг/л SLS в среде жизнеспособные клетки *M. luteus* не обнаруживались методами посева, что позволяет говорить об их гибели (рис. 7).

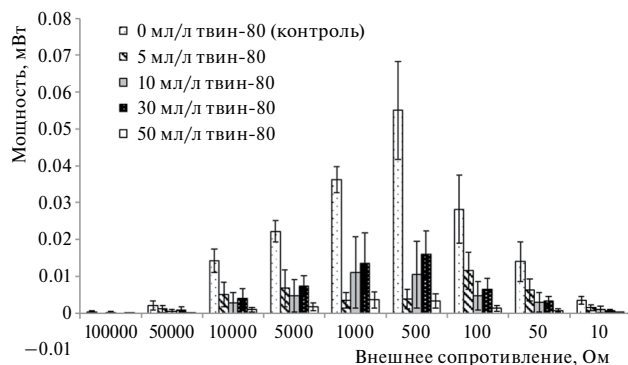


Рис. 5. Влияние неионогенного ПАВ твина-80 на мощность исследуемых БТЭ при их работе на внешнюю нагрузку (Ω) от 10 Ом до 100 кОм (анодный биокатализатор – штамм *M. luteus* 1-и; анолит – модельная сточная вода (субстрат – пептон 500 мг/л), электроды – углеродная ткань).

Подавление электрогенной активности микроорганизмов и изменение кинетики их роста под воздействием SLS сопровождалось и изменением динамики окислительно-восстановительного потенциала анолита БТЭ.

Так, в БТЭ, содержащем культуру *M. luteus* с органическим субстратом (пептон 500 мг/л) без добавления токсиканта, редокс-потенциал за 60 ч экспонирования снижался с +285 до –139 мВ. Схожую кинетику показателя наблюдали и в присутствии 50 мг/л SLS. При повышении содержания этого ПАВ до 100 мг/л в анолите БТЭ его окислительно-восстановительный потенциал уменьшался с +231 до +35 мВ. При внесении 1 г/л SLS показатель редокс-потенциал практически не изменялся, что соответствовало контрольному варианту, содержащему культуру микроорганизма-биокатализатора с модельной сточной водой без субстрата (рис. 8).

Продемонстрированные зависимости позволяют полагать, что ухудшение эффективности работы БТЭ происходило из-за токсических эффектов испытуемых ПАВ (в исследованном диапазоне концентраций) на бактериальный штамм *M. luteus* 1-и. В условиях наших экспериментов катионный ПАВ цетилтриметиламмония бромид снижал электрические характеристики БТЭ на основе штамма *M. luteus* 1-и в концентрациях от 10 мг/л, анионоактивный ПАВ лаурилсульфат

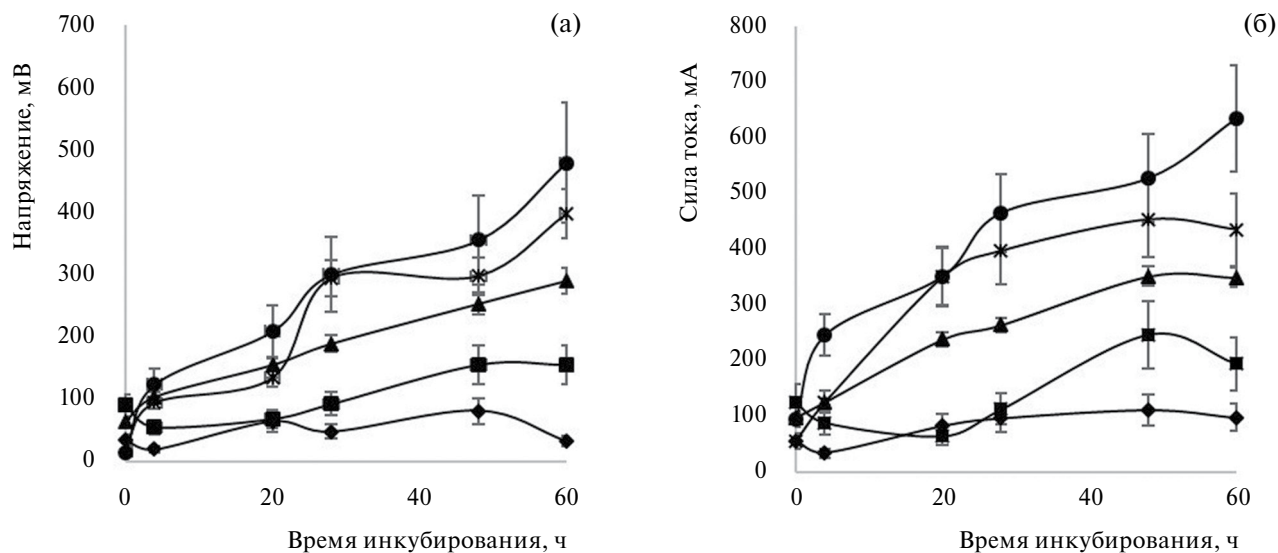


Рис. 6. Влияние анионоактивного ПАВ лаурилсульфата натрия на динамику напряжения (измерение в режиме разомкнутой цепи) (а) и силу тока (б) (измерено в режиме короткого замыкания), генерируемого в БТЭ штаммом *M. luteus* 1-и (анолит – модельная сточная вода (субстрат – пептон 500 мг/л), электроды – углеродная ткань); ● – контроль (без ПАВ); × – SLS 50 мг/л; ▲ – SLS 100 мг/л; ■ – SLS 500 мг/л; ◆ – SLS 1000 мг/л.

натрия – от 100 мг/л, неионогенный ПАВ твин-80 – от 5 мл/л. Действительно, анализ литературных данных показывает, что синтетические поверхностно-активные вещества (СПАВ) могут оказывать очень сильное действие на развитие микроорганизмов различной систематической принадлежности: бактерии, водоросли и грибы [12].

В то же время известно, что более низкие концентрации ПАВ могут приводить к повышению интенсивности выходной мощности БТЭ. Например, в работе [13] авторы наблюдали повышение выходной мощности БТЭ при использовании модификации анода твином-20. Полученный эффект, по мнению авторов, был обусловлен интенсификацией реакции переноса электронов

в результате действия ПАВ на клеточные стенки микроорганизмов, которые действуют как барьер для эффективного опосредованного внеклеточного переноса электронов [13]. Ряд других авторов также наблюдали подобные эффекты усиления выработки электроэнергии за счет внесения извне ПАВ биологического происхождения – биосурфактантов [14–16].

Интенсификация электрогенеза в БТЭ может быть связана с улучшением контакта микробных клеток с электродом. Некоторые исследователи продемонстрировали возможность ускорения

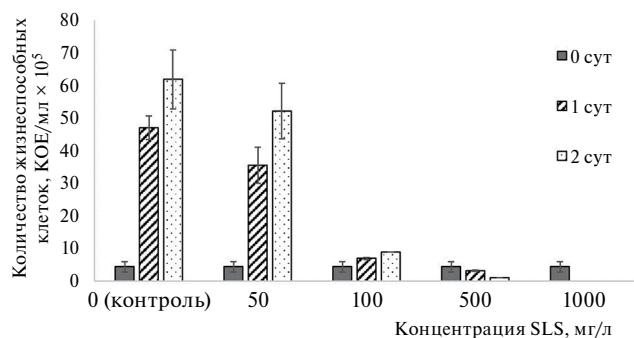


Рис. 7. Влияние различных концентраций лаурилсульфата натрия на изменение численности жизнеспособных клеток *M. luteus* 1-и при утилизации пептона (0,5 г/л) в БТЭ.

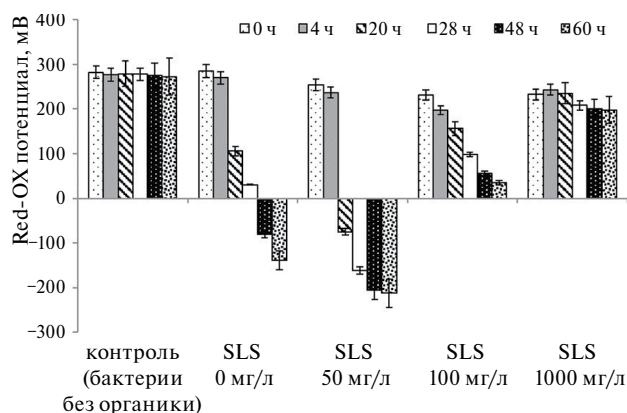


Рис. 8. Влияние различных концентраций лаурилсульфата натрия на изменение окислительно-восстановительного потенциала анолита БТЭ с культурой *M. luteus* 1-и в качестве анодного биокатализатора.

образования микробной биопленки при действии синтетических ПАВ и биосурфактантов, вырабатываемых микроорганизмами [17, 18].

Увеличение выработки электроэнергии в присутствии ПАВ может быть связано с ускорением транспорта веществ в клетку, особенно гидрофобных, за счет усиленного эмульгирования, как показано в [19, 20].

В связи с вышесказанным, в последующих экспериментах будет проанализировано действие более низких концентраций испытанных ПАВ на электрогенную активность штамма *M. luteus* 1-и. Возможно, это позволит определить диапазоны концентраций ПАВ, оказывающие положительное влияние на кинетику электрических параметров БТЭ. На основании этого могут быть сформулированы рекомендации к управлению процессами биологической очистки сточных вод, содержащих ПАВ, в технологии БТЭ.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, экспериментально показано, что цетилтриметиламмония бромид (катионный ПАВ) понижал электрические характеристики БТЭ на основе штамма *M. luteus* 1-и в концентрациях от 10 мг/л, лаурилсульфат натрия – от 100 мг/л, твин-80 – от 5 мл/л.

На примере SLS продемонстрирована взаимосвязь между подавлением электрогенной активности *M. luteus* 1-и при действии ПАВ и ингибированием роста культуры (а при определенных концентрациях загрязнителя – ее гибели). Кроме того, снижение электрогенной активности микроорганизмов и изменение кинетики их роста под воздействием SLS сопровождалось и изменением динамики окислительно-восстановительного потенциала анолита БТЭ. Это позволяет сделать вывод, что ухудшение эффективности работы исследуемых БТЭ при действии ПАВ в испытанных диапазонах концентраций связано с их токсическим действием на микробные клетки.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы благодарят Коновалову Е.Ю. за предоставление штамма *M. luteus* 1-и.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена при финансовой поддержке Правительства Ханты-Мансийского

автономного округа-Югры в рамках проекта № 2023-227-05 “Разработка эффективных методов ускорения деструкции нефтепродуктов в почвенно-климатических условиях Ханты-Мансийского автономного округа-Югра” (Пр. 10-П-1534 от 20.06.2023).

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ИНФОРМАЦИЯ

ORCID ID авторов:

Д. И. Стом <http://orcid.org/0000-0001-9496-2961>;
И. А. Топчий <http://orcid.org/0000-0002-9091-4062>;
Г. О. Жданова <http://orcid.org/0000-0002-8355-9517>;
Ю. Ю. Петрова <http://orcid.org/0000-0003-3702-2249>;
Р. В. Лепикаш <https://orcid.org/0000-0001-7853-2937>;
А. Б. Купчинский <http://orcid.org/0000-0001-8884-8636>

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Arora, J., Ranjan, A., Chauhan, A., Biswas, R., Rajput, V.D., and Sushkova, S., Surfactant pollution, an emerging threat to ecosystem: Approaches for effective bacterial degradation, *J. Appl. Microbiol.*, 2022, vol. 133, p. 1229.
<https://doi.org/10.1111/jam.15631>
2. Massarweh, O. and Abushaikh, A.S., The use of surfactants in enhanced oil recovery: A review of recent advances, *Energy Reports*, 2020, vol. 6, p. 3150.
<https://doi.org/10.1016/j.egy.2020.11.009>
3. Sutormin, O.S., Kolosova, E.M., Torgashina, I.G., Kratasyuk, V.A., Kudryasheva, N.S., Kinstler, J.S., and Stom, D.I., Toxicity of Different Types of Surfactants via Cellular and Enzymatic Assay Systems, *Int. J. Mol. Sci.*, 2023, vol. 24, p. 515.
<https://doi.org/10.3390/ijms24010515>
4. 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(9), p. 1591.
5. Chesnokova, A.N., Zakarchevsky, S.A., Zhdanova, G.O., and Stom, D.I., Electrochemical Parameters of Microbial Fuel Cells Based on the *Micrococcus luteus* Strain, New Ion-Exchange Membranes and Various Sugars, *Russ. J. Electrochem.*, 2023, vol. 59, p. 660.
<https://doi.org/10.1134/S1023193523090057>
6. Stom, D.I., Saksonov, M.N., Gavlik, E.I., Zhdanova, G.O., Sasim, S.A., Kazarinova, T. Ph., Tolstoy, M.Yu., and Gescher, J., Effect of Sodium Lauryl Sulfate on Sorption of Cells of the Electrogenic Bacterium Strain *Micrococcus luteus* on Carbon Cloth, *Indian J.*

- Microbiol.*, 2023, vol. 63, p. 50.
<https://doi.org/10.1007/s12088-023-01058-9>
7. 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 Environ Sci*, 2021, vol. 808, 012038.
<https://doi.org/10.1088/1755-1315/808/1/012038>
 8. Stom, D.I., Zhdanova, G.O., Kalashnikova, O.B., Bulaev, A.G., Kashevskii, A.V., Kupchinsky, A.B., Vardanyan, N.S., Ponamoreva, O.N., Alferov, S.V., Saksonov, M.N., Chesnokova, A.N., and Tolstoy, M.Yu., Acidophilic Microorganisms *Leptospirillum* sp., *Acidithiobacillus* sp., *Ferroplasma* sp. As a Cathodic Bioagents in a MFC, *Geomicrobiol. Journal*, 2021, vol. 38(4), p. 340,
 DOI: 10.1080/01490451.2020.1856980
 9. Стом, Д.И., Жданова, Г.О., Юдина, Н.Ю., Алферов, С.В., Чеснокова, А.Н., Толстой, М.Ю., Купчинский, А.Б., Саксонов, М.Н., Закарчевский, С.А., Энхдул, Т., Францетти, А., Рахимнеджад, М. Комплексный биопрепарат “Доктор Робик” как биоагент для утилизации фитомассы водных растений в биотопливных элементах. *Изв. вузов. Прикладная химия и биотехнология*. 2022. Т. 12. № 1 (40). С. 50. [Stom, D.I., Zhdanova, G.O., Yudi-na, N.Yu., Alferov, S.V., Chesnokova, A.N., Tolstoy, M.Yu., Kupchinsky, A.B., Saksonov, M.N., Za-karchevskiy, S.A., Enkhdul, T., Franzetti, A., and Rahimnejad, M., The “Doctor Robik 109” complex biopreparation as a bioagent for utilizing aquatic plant phytomass in biofuel cells, *Proceedings of Universities. Applied Chemistry and Biotechnology* (In Russian), 2022, vol. 12(1), p. 50.]
<https://doi.org/10.21285/2227-2925-2022-12-1-50-63>
 10. Grigorova, R. and Norris, J.R., *Methods in Microbiol-ogy*, 1990, vol. 22, 618 p.
 11. Mushtaq, M., Al-Shalabi, E.W., and AlAmeri, W., A review on retention of surfactants in enhanced oil recovery: A mechanistic insight, *Geoenergy Sci. and Engineering*, 2023, vol. 230, 212243,
<https://doi.org/10.1016/j.geoen.2023.212243>
 12. Domracheva, L.I. and Simakova, V.S., Reactions of pro- and eukaryotic microorganisms to the action of synthetic surfactants (review) *Theoret. and Appl. Ecol-ogy*, 2018, №1, p. 5.
 13. Tominaga, M., Ohmura, K., Ototani, Sh., and Dar-mawan, R., Accelerating electricity power generation and shortening incubation period of microbial fuel cell operated in tidal flat sediment by artificial surfactant anode modification, *Biochem. Engineering Journal*, 2022, vol. 185, 108536.
<https://doi.org/10.1016/j.bej.2022.108536>
 14. Pasternak, G., Askitosari, T.D., and Rosenbaum, M.A., Biosurfactants and synthetic surfactants in bio-electrochemical systems: a mini-review, *Front. Micro-biol.*, 2020, vol. 358.
<https://doi.org/10.3389/fmicb.2020.00358>
 15. Zhang, Y., Jiang, J., Zhao, Q., Gao, Y., Wang, K., Ding, J., Yu, H., and Yao, Y., Accelerating anodic bio-films formation and electron transfer in microbial fuel cells: role of anionic biosurfactants and mechanism, *Bioelectrochem.*, 2017, vol. 117, p. 48.
<https://doi.org/10.1016/j.bioelechem.2017.06.002>
 16. Zhang, Y., Jiang, J., Zhao, Q., Wang, K., and Yu, H., Analysis of functional genomes from metagenomes: revealing the accelerate electron transfer in microbial fuel cell with rhamnolipid addition, *Bioelectrochem.*, 2018, vol. 119, p. 59.
<https://doi.org/10.1016/j.bioelechem.2017.08.010>
 17. Cheng, P., Shan, R., Yuan, H.-R., Deng, L., and Chen, Y., Enhanced *Rhodococcus pyridinivorans* HR-1 anode performance by adding trehalose lipid in microbial fuel cell, *Bioresour. Technol.*, 2018, vol. 267, p. 774. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2018.08.006>
 18. Naik, S. and Jujjavarapu, S.E., Enhanced bioelectricity generation by novel biosurfactant producing bacteria in microbial fuel cells, *Environ. Technol. Innov.*, 2021, vol. 23, 101665.
<https://doi.org/10.1016/j.eti.2021.101665>
 19. Hwang, J.-H., Kim, K.-Y., Resurreccion, E.P., and Lee, W.H., Surfactant addition to enhance bioavail-ability of bilge water in single chamber microbial fuel cells (MFCs), *J. Hazardous Mater.*, 2019, vol. 368, p. 732.
<https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2019.02.007>
 20. Wen, Q., Kong, F., Ma, F., Ren, Y., and Pan, Zh., Im-proved performance of air-cathode microbial fuel cell through additional Tween 80, *J. Power Sources*, 2011, vol. 196(3), p. 899.
<https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2010.09.009>