

ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ

УДК 573.6+579.695

doi: 10.26907/2542-064X.2022.2.279-296

ГЕНЕРИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСТВА В БТЭ БИОПРЕПАРАТОМ «ДОКТОР РОБИК» ПРИ ОЧИСТКЕ АЗОТСОДЕРЖАЩИХ СТОЧНЫХ ВОД

Г.О. Жданова¹, Д.И. Стом^{1,2,3}, Н.Ю. Юдина⁴, С.В. Алферов⁴,
З.У. Джангидзе⁵, А.Д. Стом¹, М.Ю. Толстой², И.А. Богданова¹,
А.Н. Чеснокова²

¹Иркутский государственный университет, г. Иркутск, 664003, Россия

²Иркутский национальный исследовательский технический университет,
г. Иркутск, 664074, Россия

³Байкальский музей СО РАН, п. Листвянка, Иркутская обл., 664520, Россия

⁴Тульский государственный университет, г. Тула, 300012, Россия

⁵Московский государственный строительный университет, г. Москва, 129337, Россия

Аннотация

В работе оценена способность коммерческого биопрепарата для выгребных ям и септиков «Доктор Робик 109» (ООО «ВИПЭКО», г. Москва) генерировать электрический ток в биотопливных элементах (БТЭ) при утилизации некоторых азотсодержащих компонентов канализационных сточных вод: мочевины, аммонийного азота, пептона. Генерирование тока микроорганизмами препарата в БТЭ сопровождалось ростом численности клеток, убылью испытуемых субстратов и изменением окислительно-восстановительного потенциала анолита. Например, в БТЭ, содержащем модельную сточную воду с добавлением 0.5 г/л мочевины, препарат «Доктор Робик 109» генерировал напряжение разомкнутой цепи до 332 мВ (за 5 сут), в БТЭ с 0.5 г/л NH_4^+ – до 483 мВ (за 1 сут), с пептоном (0.5 г/л) – до 520 мВ (за 10 сут). Сила тока (измерена в режиме короткого замыкания) в БТЭ с мочевиной достигала 519 мкА, а в БТЭ с пептоном была более чем в 2 раза выше (до 1248 мкА). На основе полученных данных, с учетом широкой субстратной специфичности микроорганизмов препарата, его низкой стоимости и удобства применения даны рекомендации по применению этого биопрепарата в биотехнологиях утилизации отходов, очистки сточных вод различных типов (коммунальных, животноводства, пищевой промышленности и пр.), в том числе в БТЭ с одновременным получением электрического тока.

Ключевые слова: биотопливные элементы, генерирование электрического тока, микроорганизмы-биоагенты, биопрепараты, «Доктор Робик», азотсодержащие сточные воды, очистка сточных вод

Введение

Важнейшей задачей в исследованиях, связанных с технологией биотопливных элементов (БТЭ), является поиск перспективных микроорганизмов-биоаккумуляторов [1–3]. Именно они в первую очередь обеспечивают эффективность процессов генерирования электрической энергии при трансформации различных

субстратов – в том числе и компонентов отходов и сточных вод [4–6]. Важнейшими свойствами, определяющими привлекательность микроорганизмов для технологии БТЭ, являются их высокая метаболическая активность по отношению к конкретным веществам, широкая субстратная специфичность, возможность трансформировать соединения при отсутствии кислорода. При этом важна и способность микроорганизмов к внеклеточной передаче электронов, которые высвобождаются при трансформации субстрата, на акцептор, которым для анодных биоагентов в анолите БТЭ выступает электрод.

Технология БТЭ нередко применяется для очистки сточных вод с одновременным получением при этом электричества. Исследователи используют в БТЭ различные типы сточных вод, в частности сточные воды животноводства [7, 8], пищевой [9–11] и целлюлозно-бумажной промышленности [12, 13], нефтехимической отрасли [14, 15], текстильных производств [16, 17] и т. п. Однако чаще всего выбор падает на хозяйственно-бытовые сточные воды [18, 19]. При этом в качестве биоагентов применяют, как правило, отдельные штаммы электрогенных бактерий [2, 3, 20–23].

Можно ожидать, что наиболее перспективными биоагентами для технологии БТЭ окажутся микробные консорциумы [5, 6, 24], поскольку наличие взаимосвязанных устойчивых групп микроорганизмов различных видов обуславливает их более высокую резистентность к факторам среды и условиям культивирования. Кроме того, микробные консорциумы способны к элиминированию более широкого спектра соединений, чем отдельные штаммы. Еще одно их преимущество состоит в том, что в них продукты метаболизма одних микроорганизмов являются субстратом для других.

Применение микробных консорциумов требует их тщательного подбора и экспериментальной проверки [25, 26]. Одним из вариантов этого служит применение уже сформированных микробных ассоциаций, например активного ила [27] или анодных биопленок, образовавшихся непосредственно в сточных водах, которые подвергаются очистке [28, 29].

Таковыми консорциумами микроорганизмов, способными к активной деструкции различных отходов, являются, в частности, коммерческие микробиологические препараты, предназначенные для очистки сточных вод, выгребных ям и септиков. Довольно широкий спектр подобных препаратов производит ROEBIC Laboratories, Inc. (США). Имеется литература о применении таких биопрепаратов для очистки сточных вод и переработки отходов [30–32]. Одним из таких препаратов, выпускаемых в России, является «Доктор Робик 109» (ООО «ВИПЭКО», г. Москва), выбранный из линейки «Доктор Робик» и предназначенный для утилизации широкого круга соединений (бумага, жиры, белки и др.). Кроме того, он предназначен для использования в выгребных ямах и септиках, что обуславливает его способность к работе в условиях высокой концентрации органики и низкого содержания кислорода. Отмеченные характеристики препарата «Доктор Робик 109» позволили предположить перспективность его использования в качестве биоагента в БТЭ. Однако публикаций, посвященных применению коммерческих биопрепаратов в технологии БТЭ, за исключением более ранних наших разработок, обнаружить не удалось.

В связи с этим целью настоящего исследования явилась оценка эффективности работы БТЭ на основе комплексного коммерческого биопрепарата «Доктор Робик 109» при утилизации некоторых азотсодержащих компонентов сточных вод.

1. Объекты и методы исследования

1.1. Биотопливные элементы. Эксперименты проводились с использованием макетов двухкамерных БТЭ из оргстекла. Камеры (каждая объемом 400 мл) были соединены между собой протонообменной мембраной «МФ-4СК» (ЗАО «Пластполимер», г. Санкт-Петербург). Камеры имеют отверстия для размещения рабочих электродов, в качестве которых служила углеродная ткань «Урал» (ОАО «Светлогорскхимволокно», Беларусь). Размеры электрода составляли 30 × 150 мм. В катодной камере также располагалось дополнительное отверстие. Его применяли для аэрации католита путем размещения в нем силиконовой трубки воздушного компрессора. Внесение субстрата и биоагента в анолит осуществляли при помощи стерильного шприца через специальную резиновую заглушку в боковой части БТЭ [33]. Такая модификация ячейки позволяет производить отбор проб или внесение субстратов и биоагентов без нарушения стерильности и анаэробных условий в анолите.

Основной рабочей средой во всех камерах служила модифицированная модельная сточная вода (МСВ) следующего состава (г/л): Na_2CO_3 – 0.05; K_2HPO_4 – 0.03; CaCl_2 – 0.01; $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ – 0.01, $(\text{NH}_4)_2\text{HPO}_4$ – 0.025 [34]. Стерилизацию проводили автоклавированием при 1 атм в течение 45 мин. Исходный уровень рН анолита и католита составлял 6.7–7.5 ед. В качестве субстратов для исследуемых микроорганизмов использовали пептон, мочевины, аммоний (в виде хлорида аммония). Их вносили в анолит БТЭ в концентрации 0.5 г/л.

1.2. Микроорганизмы-биоагенты в БТЭ. Биоагентом в БТЭ выступал комплексный коммерческий микробиологический препарат для выгребных ям и септиков «Доктор Робик 109» (ООО «ВИПЭКО», г. Москва). В составе препарата представлены споры *Bacillus amyloliquefaciens*, *B. pumilis*, *B. licheniformis*, *B. subtilis* в комплексе с пшеничными отрубями и пищевой содой. Титр микроорганизмов в препарате – $3 \cdot 10^{10}$ КОЕ/г.

Препарат вносили в БТЭ в виде суспензии, для ее получения 1 г сухого препарата вносили в 30 мл стерильного физиологического раствора. Полученную взвесь в течение 20 мин перемешивали на магнитной мешалке, затем отстаивали в течение 2–3 мин для оседания опилок и вытягивали верхний слой жидкости. Этой суспензией, содержащей споры микроорганизмов препарата, инокулировали БТЭ. Титр клеток при внесении в БТЭ составлял примерно 10^5 КОЕ/мл. Для получения инактивированного препарата его подвергали автоклавированию (1 атм в течение 40 мин).

1.3. Методы исследования. Изучение электрогенной активности микроорганизмов в БТЭ. Перед началом работы обе камеры БТЭ стерилизовали 3%-ным раствором перекиси водорода в течение 20 мин. После этого каждый отсек БТЭ промывали дистиллированной водой, чтобы удалить остатки H_2O_2 , и помещали

под ультрафиолет («МЕД-1», Россия) на 15 мин. Далее с соблюдением всех правил асептики в камеры БТЭ добавляли модельную сточную воду [34]. Анодную ячейку заполняли полностью до самого верха, чтобы вытеснить воздух из камеры. В катодной камере уровень жидкости был на 2–3 см ниже верхнего уровня отсека, это позволяло аэрировать католит. Через специальные отверстия в верхней части БТЭ помещали электроды из углеродной ткани, которые фиксировали резиновыми пробками, плотно прилегающими к крышке. Биоагенты и субстрат вносили при помощи стерильного шприца через специальную резиновую заглушку в боковой части анодной камеры.

Измерение электрических характеристик БТЭ. Регистрацию силы тока и напряжения проводили двумя способами – с использованием мультиметра Fluke 17B (Fluke Corporation, США) и при помощи автоматической системы регистрации данных с биотопливных элементов. Система состоит из микропроцессорной платы Arduino Mega 2560 (Arduino, Италия) и персонального компьютера и платы адаптера для подсоединения к топливным элементам. Измерение электрических параметров при работе БТЭ на внешнюю нагрузку (от 10 Ом до 100 кОм) проводили при подключении БТЭ к магазину сопротивлений P-33.

Исследование динамики окислительно-восстановительного потенциала БТЭ. При исследовании динамики окислительно-восстановительного потенциала БТЭ использовали модифицированную конструкцию БТЭ. В анодные камеры таких БТЭ герметично помещали комбинированные редокс-электроды ЭРП-105 (чувствительный элемент – платина, встроенный электрод сравнения – хлорсеребряный). Фиксацию окислительно-восстановительного потенциала осуществляли с помощью анализатора жидкости «ЭКСПЕРТ - 001» (Россия).

Определение общего микробного числа биоагентов в БТЭ. Общее микробное число в анодной камере БТЭ определяли методом серийных разведений с последующим высевом на плотную среду (метод Коха) [35]. Культивирование микроорганизмов осуществляли на рыбо-пептонном агаре. Посевы инкубировали при температуре 28–30 °С в течение 3 сут.

Определение содержания органических субстратов в БТЭ. Концентрацию мочевины в анолите БТЭ анализировали фотометрическим методом с *n*-диметиламинобензальдегидом [36, 37], аммония – фотометрическим методом с реактивом Несслера [38], глюкозы – фотометрическим методом определения редуцирующих сахаров с 2,3,5-трифенилтетразолием хлористым [39]. Оценивали также показатель химического потребления кислорода (ХПК) ускоренным методом [40].

Статистическая обработка экспериментальных данных была проведена с использованием программы Excel. Все эксперименты проводили не менее чем в 5 независимых опытах с 3 параллельными измерениями в каждом. Выводы сделаны при вероятности безошибочного прогноза $p \geq 0.95$. Достоверность различия результатов определяли с помощью критерия Стьюдента.

2. Результаты и их обсуждение

Наиболее типичным компонентом сточных вод, особенно хозяйственно-бытовых и предприятий животноводства, являются азотсодержащие соединения. Они могут быть представлены в нитратной, аммонийной форме, в виде белков, мочевины и т. п. [41].

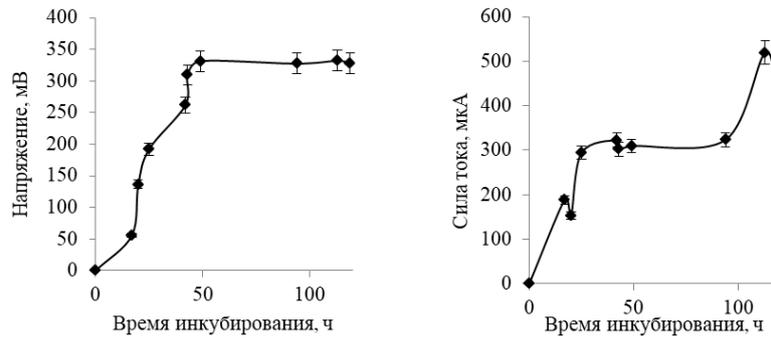


Рис. 1. Динамика напряжения (а) и силы тока (б), генерируемого в БТЭ микробным препаратом «Доктор Робик 109» при использовании мочевины (среда – модельная сточная вода, электроды – углеродная ткань, концентрация мочевины – 0.5 г/л)

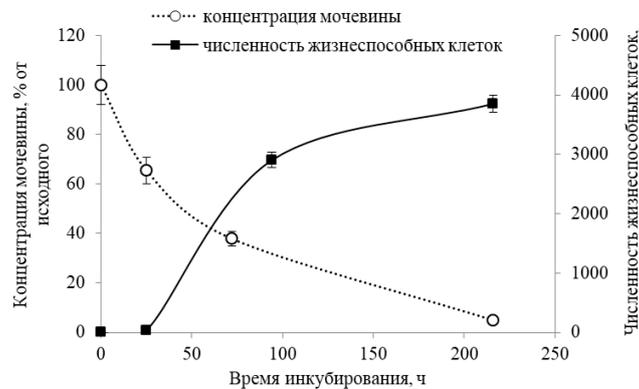


Рис. 2. Динамика численности жизнеспособных клеток микробного препарата «Доктор Робик 109» и концентрации мочевины в анолите БТЭ в ходе его работы (среда – модельная сточная вода, электроды – углеродная ткань, концентрация мочевины – 0.5 г/л)

Проведенные эксперименты выявили способность микроорганизмов препарата «Доктор Робик 109» генерировать электричество в БТЭ при использовании в качестве субстрата мочевины в концентрации 0.5 г/л. Так, БТЭ, содержащий модельную сточную воду с добавлением 0,5 г/л мочевины и препарат «Доктор Робик 109» в качестве биоагента, в течение 119 ч эксперимента генерировал напряжение до 332 ± 15.5 мВ, силу тока – до 519 ± 30.5 мкА (рис. 1). Такое увеличение электрических показателей исследуемых БТЭ говорит о способности микроорганизмов препарата «Доктор Робик 109» использовать мочевины в качестве субстрата в условиях биотопливных элементов. Об этом же свидетельствовали также убыль концентрации мочевины в модельной сточной воде (на 95% от исходного) и увеличение численности клеток микроорганизмов биопрепарата (с $(1.08 \pm 0.73) \cdot 10^8$ до $(3.85 \pm 1.46) \cdot 10^{11}$ КОЕ/мл) в течение 9 сут экспонирования (рис. 2).

В качестве еще одного из азотсодержащих субстратов использовали аммонийный азот, входящий в состав широкого круга отходов жизнедеятельности человека и животных. Источником аммония в экспериментах служила его соль NH_4Cl . В БТЭ с добавлением 0.5 г/л NH_4^+ препарат «Доктор Робик 109» в течение 24 ч инкубирования вырабатывал напряжение порядка 483 мВ (рис. 3). При этом

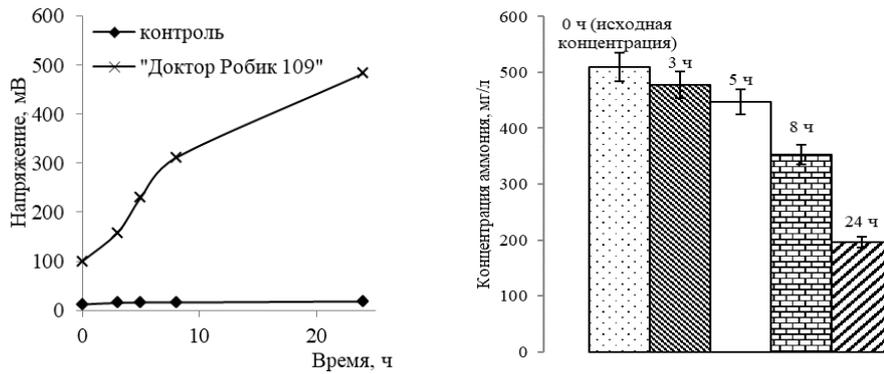


Рис. 3. Динамика напряжения (а) и изменение концентрации аммонийного азота (б) в БТЭ под действием микробного препарата «Доктор Робик 109» (среда – модельная сточная вода, исходное содержание NH_4^+ – 0.5 г/л (в виде NH_4Cl), электроды – углеродная ткань)

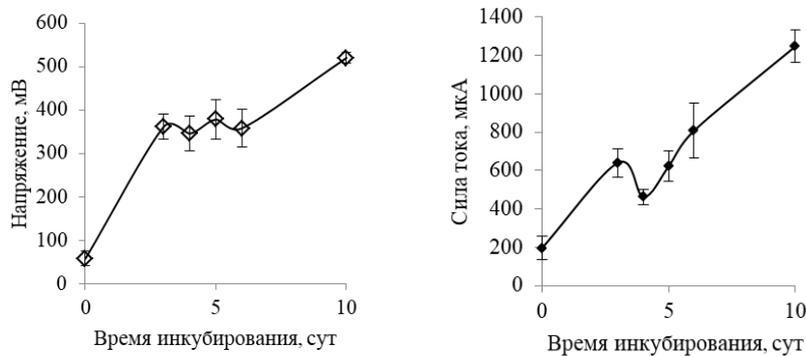


Рис. 4. Динамика напряжения (а) и силы тока (б), генерируемого в БТЭ микробным препаратом «Доктор Робик 109» при использовании пептона (среда – модельная сточная вода, электроды – углеродная ткань, концентрация пептона – 0.5 г/л)

в исследуемых БТЭ в течение 24 ч эксперимента происходило последовательное снижение концентрации аммонийного азота с 508.9 ± 25.4 до 196.4 ± 9.8 мг/л (рис. 3, б).

Положительную динамику электрических показателей отмечали и при применении такого азотсодержащего субстрата, как пептон. Например, в течение 5 сут эксперимента напряжение, генерируемое в БТЭ препаратом «Доктор Робик 109» при использовании пептона (0.5 г/л), возрастало до 378 мВ, сила тока составила 621 мкА. На 10-е сутки инкубирования анализируемые показатели достигали 520 мВ и 1248 мкА (рис. 4).

Окислительно-восстановительный потенциал анолита работающего БТЭ (то есть содержащего нативный препарат «Доктор Робик 109») с ростом электрических показателей снижался с +373 мВ с переходом в отрицательные значения. Через 42 ч инкубирования он достигал –411 мВ. В то же время в анолите БТЭ, содержащем инактивированный термическим воздействием препарат, существенных изменений окислительно-восстановительного потенциала не происходило (рис. 5).

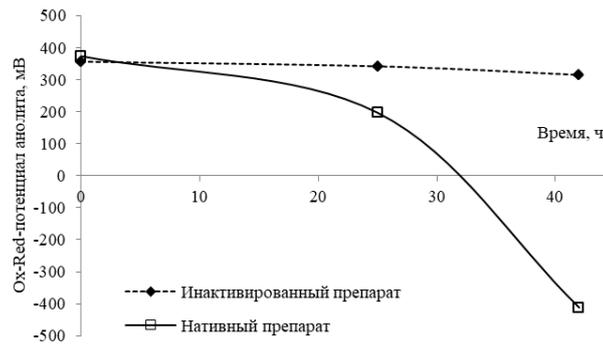


Рис. 5. Динамика окислительно-восстановительного потенциала анолита БТЭ, содержащего нативный и инактивированный микробиологический препарат «Доктор Робик 109» в качестве биоагента (среда – модельная сточная вода, электроды – углеродная ткань, концентрация пептона – 0.5 г/л)

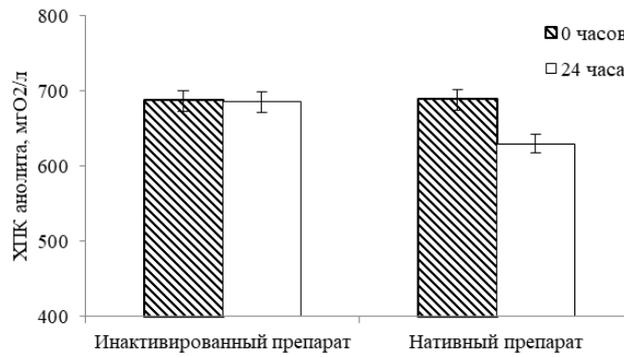


Рис. 6. Изменение показателя химического потребления кислорода (ХПК) анолита БТЭ (нативный и автоклавированный препарат «Доктор Робик 109», среда – модельная сточная вода, субстрат – пептон 0.5 г/л)

Интегральным показателем качества очистки сточной воды является индекс химического потребления кислорода (ХПК). Серией измерений ХПК в БТЭ в условиях наших опытов была подтверждена возможность использования комплексных микробиологических препаратов для очистки сточных вод от органических веществ с одновременной выработкой электроэнергии. В качестве контроля использовали БТЭ, инокулированные инактивированными микроорганизмами препарата «Доктор Робик 109».

На начало эксперимента показатель ХПК составлял 688 мгО₂/л, через 24 ч – 629 мгО₂/л, что на 7% меньше исходного значения. В то же время в контрольном БТЭ, содержащем препарат, инактивированный автоклавированием, показана убыль ХПК за 24 ч всего 0.4%, что меньше статистической погрешности опыта (рис. 6).

Измерение работы испытуемых БТЭ на основе биопрепарата «Доктор Робик 109» на внешнюю нагрузку (от 10 Ом до 100 кОм) показало следующее. Мощность БТЭ на основе биопрепарата при добавлении пептона (0.5 г/л) достигала наибольших значений (13.4 мкВт) на 2-е сутки экспонирования при внешнем сопротивлении 1000 Ом (рис. 7). Для БТЭ с мочевиной (0.5 г/л) этот показатель был максимальным при 500 Ом и составлял 14.5 мкВт (рис. 8).

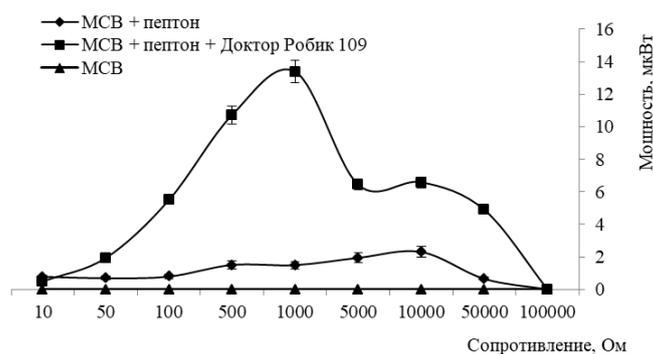


Рис. 7. Зависимость мощности БТЭ с микробным препаратом «Доктор Робик 109» от внешнего сопротивления (среда – модельная сточная вода, субстрат – пептон 0.5 г/л, электроды – углеродная ткань, время экспонирования БТЭ – 2 сут)

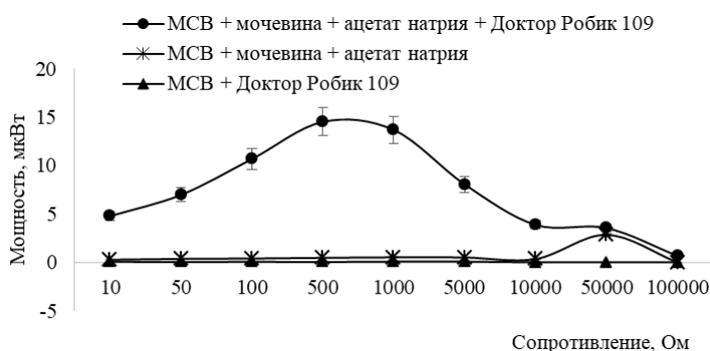


Рис. 8. Зависимость мощности БТЭ с микробным препаратом «Доктор Робик 109» за 2 сут экспонирования от внешнего сопротивления (среда – модельная сточная вода, субстрат – ацетат натрия 0.5 г/л + мочевины 0.5 г/л, электроды – углеродная ткань)

Сопоставление полученных в настоящей работе данных с результатами исследований, проведенных нами ранее (в том числе на других субстратах), показало следующее. При работе испытуемых БТЭ с биопрепаратом «Доктор Робик 109» на внешнюю нагрузку максимальная мощность развивалась на 2-е сутки эксперимента и составляла: с пептоном – 13.4 мкВт (при работе БТЭ на внешнюю нагрузку 1000 Ом); с добавлением углеводов – глюкозы и целлюлозы – 8.3 (при 100 Ом) и 17.8 мкВт (при 50–100 Ом); со смесью мочевины + ацетат – 14.5 мкВт (при 500 Ом); с подсолнечным маслом – 19 мкВт (при 100 Ом), со сливочным маслом – 9.5 мкВт (при 10 Ом). Более высокими значениями мощности характеризовались БТЭ, в которых субстратами для микроорганизмов биопрепарата выступали такие отходы, как осадки сточных вод (45 мкВт при 100 Ом) и фитомасса водного растения элодеи (54 мкВт при 500 Ом). В этом случае показатели достигали максимальных значений на 3-и сутки эксперимента. Таким образом, испытуемые субстраты по величине максимальной мощности, генерируемой в БТЭ биопрепаратом «Доктор Робик 109» с их использованием, можно расположить в следующем порядке (по убыванию показателя): фитомасса элодеи (54 мкВт) > осадки сточных вод (45 мкВт) > подсолнечное масло (19 мкВт) >

целлюлоза (17.8 мкВт) > смесь ацетат + мочевины (14.5 мкВт) > пептон (13.4 мкВт) > сливочное масло (9.5 мкВт) > глюкоза (8.3 мкВт).

Заключение

Таким образом, продемонстрированы перспективы применения коммерческого биопрепарата для выгребных ям и септиков «Доктор Робик 109» в качестве биоагента в технологии БТЭ при утилизации основных азотсодержащих компонентов канализационных сточных вод: мочевины, аммонийного азота, пептона. Генерирование тока биопрепаратом в БТЭ сопровождалось ростом численности клеток микроорганизмов, убылью испытуемых субстратов и изменением окислительно-восстановительного потенциала анолита.

Коммерческий препарат «Доктор Робик 109» является специально подобранной композицией активных микроорганизмов-деструкторов. Наличие в составе препарата различных видов микроорганизмов обуславливает их более высокую устойчивость к факторам среды и условиям культивирования, а также более широкую субстратную специфичность, чем у отдельных штаммов. Кроме того, процедура использования препарата значительно упрощается благодаря тому, что он выпускается в виде готового продукта, в связи с чем отсутствует необходимость подготовки специальных сред для наращивания бактериальной биомассы, наличия специальных профессиональных навыков. Это может быть особенно важным в случае выхода технологии за пределы лабораторных испытаний и создания устройств БТЭ для практического пользования (локальные системы очистки для туристических баз, фермерских и подсобных хозяйств и др.). Этот вывод подтверждается результатами и других наших работ. Например, в проведенных нами ранее исследованиях электрогенная активность этого биопрепарата в БТЭ показана при утилизации жиров [42], фитомассы водных растений [43], осадков сточных вод [44]. Широта субстратной специфичности этого биоагента, низкая стоимость, удобство применения позволяют рекомендовать его к использованию в биотехнологиях утилизации отходов, очистки сточных вод различных типов (коммунальных, животноводства, пищевой промышленности и др.), в том числе в БТЭ с одновременным получением электрического тока.

Благодарности. Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках государственного задания в области научной деятельности (проект № FEWG-2021-0013).

Литература

1. *Konovalova E.Yu., Stom D.I., Zhdanova G.O., Yuriev D.A., Li Y., Barbora L., Goswami P.* The microorganisms used for working in microbial fuel cells // AIP Conf. Proc. – 2018. – V. 1952. – Art. 020017, P. 1–10. – doi: 10.1063/1.5031979.
2. *Badea S.L., Enache S., Tamaian R., Niculescu V.-C., Varlam M., Pirvu C.-V.* Enhanced open-circuit voltage and power for two types of microbial fuel cells in batch experiments using *Saccharomyces cerevisiae* as biocatalyst // J. Appl. Electrochem. – 2019. – V. 49, No 1. – P. 17–26. – doi: 10.1007/s10800-018-1254-7.

3. *Dai H.N., Nguyen T.-A. D., My LE L.-Ph., Tran M.V., Lan T.-H., Wang Ch.-T.* Power generation of *Shewanella oneidensis* MR-1 microbial fuel cells in bamboo fermentation effluent // *Int. J. Hydrogen Energy*. – 2021. – V. 46, No 31. – P. 16612–16621. – doi: 10.1016/j.ijhydene.2020.09.264.
4. *Choudhury P., Uday U.Sh.P., Bandyopadhyay T.K., Ray R.N., Bhunia B.* Performance improvement of microbial fuel cell (MFC) using suitable electrode and Bioengineered organisms: A review // *Bioengineered*. – 2017. – V. 8, No 5. – P. 471–487. – doi: 10.1080/21655979.2016.1267883.
5. *Ren J., Li N., Du M., Zhang Y., Hao Ch., Hu R.* Study on the effect of synergy effect between the mixed cultures on the power generation of microbial fuel cells // *Bioengineered*. – 2021. – V. 12, No 1. – P. 844–854. – doi: 10.1080/21655979.2021.1883280.
6. *Jadhav D.A., Ghangrekar M.M.* Optimising the proportion of pure and mixed culture in inoculum to enhance the performance of microbial fuel cells // *Int. J. Environ. Technol. Manage.* – 2020. – V. 23, No 1. – P. 50–67. – doi: 10.1504/IJETM.2020.110159.
7. *Lai M.-F., Lou Ch.-W., Lin J.-H.* 3D composite electrodes of microbial fuel cells used in livestock wastewater: Evaluations of coating and performance // *Int. J. Hydrogen Energy*. – 2017. – V. 42, No 45. – P. 27666–27676. – doi: 10.1016/j.ijhydene.2017.07.021.
8. *Xin Sh., Shen J., Liu G., Chen Q., Xiao Zh., Zhang G., Xin Y.* High electricity generation and COD removal from cattle wastewater in microbial fuel cells with 3D air cathode employed non-precious Cu₂O/reduced graphene oxide as cathode catalyst // *Energy*. – 2020. – V. 196. – Art. 117123, P. 1–10. – doi: 10.1016/j.energy.2020.117123.
9. *Sreelekshmy B.R., Basheer R., Sivaraman S., Vasudevan V., Elias L., Shibli S. M. A.* Sustainable electric power generation from live anaerobic digestion of sugar industry effluents using microbial fuel cells // *J. Mater. Chem. A*. – 2020. – V. 8, No 12. – P. 6041–6056. – doi: 10.1039/D0TA00459F.
10. *Tessema T.D., Yemata T.A.* Experimental dataset on the effect of electron acceptors in energy generation from brewery wastewater via a microbial fuel cell // *Data Brief*. – 2021. – V. 37. – Art. 107272, P. 1–10. – doi: 10.1016/j.dib.2021.107272.
11. *Pugazhendhi A., Al-Mutairi A.E., Jamal M.T., Jeyakumar R.B., Palanisamy K.* Treatment of seafood industrial wastewater coupled with electricity production using air cathode microbial fuel cell under saline condition // *Int. J. Energy Res.* – 2020. – V. 44, No 15. – P. 12535–12545. – doi: 10.1002/er.5774.
12. *Elakkiya E., Niju S.* Bioelectrochemical treatment of real-field bagasse-based paper mill wastewater in dual-chambered microbial fuel cell // *3 Biotech*. – 2021. – V. 11, No 2. – Art. 42, P. 1–10. – doi: 10.1007/s13205-020-02606-6.
13. *Narayan M., Solanki P., Rabha A.K., Srivastava R.K.* Treatment of pulp and paper industry effluent and electricity generation by constructed wetland coupled with microbial fuel cell (CW-MFC) // *J. Pharmacogn. Phytochem.* – 2018. – V. 7, No 6. – P. 493–498.
14. *Sarmin S., Ideris A.B., Ethiraj B., Islam M.A., Yee Ch.S., Khan Md.M.R.* Potentiality of petrochemical wastewater as substrate in microbial fuel cell // *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.* – 2020. – V. 736, No 3. – Art. 032015, P. 1–10. – doi: 10.1088/1757-899X/736/3/032015.
15. *Sarmin S., Ethiraj B., Islam M.A., Ideris A., Yee Ch.S., Khan Md.M.R.* Bio-electrochemical power generation in petrochemical wastewater fed microbial fuel cell // *Sci. Total Environ.* – 2019. – V. 695. – Art. 133820, P. 1–11. – doi: 10.1016/j.scitotenv.2019.133820.
16. *Ilamathi R., Jayapriya J.* Microbial fuel cells for dye decolorization // *Environ. Chem. Lett.* – 2018. – V. 16, No 1. – P. 239–250. – doi: 10.1007/s10311-017-0669-4.

17. *Miran W., Jang J., Nawaz M., Shahzad A., Lee D.S.* Sulfate-reducing mixed communities with the ability to generate bioelectricity and degrade textile diazo dye in microbial fuel cells // *J. Hazard. Mater.* – 2018. – V. 352. – P. 70–79. – doi: 10.1016/j.jhazmat.2018.03.027.
18. *Feng C., Tsai Ch.-Ch., Ma Ch.-Y., Yu Ch.-P., Hou Ch.-H.* Integrating cost-effective microbial fuel cells and energy-efficient capacitive deionization for advanced domestic wastewater treatment // *Chem. Eng. J.* – 2017. – V. 330. – P. 1–10. – doi: 10.1016/j.cej.2017.07.122.
19. *Stager J.L., Zhang X., Logan B.E.* Addition of acetate improves stability of power generation using microbial fuel cells treating domestic wastewater // *Bioelectrochemistry.* – 2017. – V. 118. – P. 154–160. – doi: 10.1016/j.bioelechem.2017.08.002.
20. *Kuznetsov A.V., Khorina N.N., Konovalova E.Yu., Amsheev D.Yu., Ponamoreva O.N., 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 Environ. Sci.* – 2021. – V. 808. – Art. 012038, P. 1–7. – doi: 10.1088/1755-1315/808/1/012038.
21. *Goenka R., Mukherji S., Ghosh P.C.* Characterization of electrochemical behaviour of *Escherichia coli* MTCC 1610 in a microbial fuel cell // *Bioresour. Technol. Rep.* – 2018. – V. 3. – P. 67–74. – doi: 10.1016/j.biteb.2018.06.002.
22. *García-Mayagoitia S., Fernández-Luqueño F., Morales-Acosta D., Carrillo-Rodríguez J.C., García-Lobato M.A., de la Torre-Saenz L., Alonso-Lemus I.L., Rodríguez-Varela F.J.* Energy generation from pharmaceutical residual water in microbial fuel cells using ordered mesoporous carbon and *Bacillus subtilis* as bioanode // *ACS Sustainable Chem. Eng.* – 2019. – V. 7, No 14. – P. 12179–12187. – doi: 10.1021/acssuschemeng.9b01281.
23. *Cheng P., Shan R., Yuan H.-R., Shen W., Chen Y.* Bioelectricity generation from the salinomycin-simulated livestock sewage in a *Rhodococcus pyridinivorans* inoculated microbial fuel cell // *Process Saf. Environ. Prot.* – 2020. – V. 138. – P. 76–79. – doi: 10.1016/j.psep.2020.03.003.
24. *Cao Y., Mu H., Liu W., Zhang R., Guo J., Xian M., Liu H.* Electricigens in the anode of microbial fuel cells: Pure cultures versus mixed communities // *Microb. Cell Fact.* – 2019. – V. 18. – Art. 39, P. 1–14. – doi: 10.1186/s12934-019-1087-z.
25. *Islam M.A., Ong H.R., Ethiraj B., Cheng Ch.K., Khan M.M.R.* Optimization of co-culture inoculated microbial fuel cell performance using response surface methodology // *J. Environ. Manage.* – 2018. – V. 225. – P. 242–251. – doi: 10.1016/j.jenvman.2018.08.002.
26. *Islam M.A., Ethiraj B., Cheng Ch. K., Yousuf A., Khan Md.M.R.* An insight of synergy between *Pseudomonas aeruginosa* and *Klebsiella variicola* in a microbial fuel cell // *ACS Sustainable Chem. Eng.* – 2018. – V. 6, No 3. – P. 4130–4137. – doi: 10.1021/acssuschemeng.7b04556.
27. *Wang C.-T., Sangeetha T., Zhao F., Garg A., Chang C.-T., Wang C.-H.* Sludge selection on the performance of sediment microbial fuel cells // *Int. J. Energy Res.* – 2018. – V. 42. – P. 4250–4255. – doi: 10.1002/er.4168.
28. *He J., Xin X., Pei Zh., Chen L., Chu Zh., Zhao M., Wu X., Li B., Tang X., Xiao X.* Microbial profiles associated improving bioelectricity generation from sludge fermentation liquid via microbial fuel cells with adding fruit waste extracts // *Bioresour. Technol.* – 2021. – V. 337. – Art. 125452, P. 1–9. – doi: 10.1016/j.biortech.2021.125452.
29. *Almatouq A., Babatunde A.O., Khajah M., Webster G., Alfodari M.* Microbial community structure of anode electrodes in microbial fuel cells and microbial electrolysis cells // *J. Water Process Eng.* – 2020. – V. 34. – Art. 101140, P. 1–10. – doi: 10.1016/j.jwpe.2020.101140.
30. *Heber A.J., Ni J., Sutton A.L., Patterson J.A., Fakhoury K.J., Kelly D.T., Shao P.* Laboratory testing of commercial manure additives for swine odor control (Final Report). – Ames, IA: USDA-ARS-Natl. Swine Res. Inf. Cent., 2001. – 198 p.

31. *Ignatavičius G., Oškinis V.* Investigation of black oil and diesel biodegradation in water // *Ekologija*. – 2007. – V. 53, No 4. – P. 90–94.
32. *Skaisgiriene A., Vaitiekūnas P., Zabukas V.* Influence of chlorides and sulphates on quality of biological wastewater treatment using enzyme preparations // *J. Environ. Eng. Landscape Manage.* – 2004. – V. 12, No 3. – P. 91–95. – doi: 10.1080/16486897.2004.9636825.
33. *Stom D.I., Zhdanova G.O., Kashevskii A.V.* New designs of biofuel cells and testing of their work // *IOP Conf. Ser: Mater. Sci. Eng.* – 2017. – V. 262. – Art. 012219, P. 1–6. – doi: 10.1088/1757-899X/262/1/012219.
34. ГОСТ 32509-2013. Вещества поверхностно-активные. Метод определения биоразлагаемости в водной среде. – М.: Стандартинформ, 2019. – 26 с.
35. *Grigorova R., Norris J.R.* (Eds.) *Methods in Microbiology*. V. 22: Techniques in microbial ecology. – Acad. Press, 1990. – 627 p.
36. *Басова Е.М., Буланова М.А., Иванов В.М.* Фотометрическое определение мочевины в природных водах // *Вестн. Моск. ун-та. Сер. 2. Химия*. – 2011. – Т. 52, № 6. – С. 419–425.
37. *Hoseney R.C., Finney K.F.* Spectrophotometric determination of urea, thiourea, and certain of their substitution products with *p*-dimethylaminobenzaldehyde and diacetylmonoxime // *Anal. Chem.* – 1964. – V. 36, No 11. – P. 2145–2148. – doi: 10.1021/ac60217a034.
38. РД 52.24.486-2009. Массовая концентрация аммиака и ионов аммония в водах. Методика выполнения измерений фотометрическим методом с реактивом Несслера. – Ростов на/Д., 2009. – 21 с.
39. *Нетрусов А.И., Егорова М.А., Захарчук Л.М.* Практикум по микробиологии / Под ред. А.И. Нетрусова. – М.: Академия, 2005. – 608 с.
40. *Беленькая С.Л., Попова Ю.И., Калитивянская В.И.* Определение ХПК в сточных водах. – URL: http://www.sergey-osetrov.narod.ru/Documents/How_to_define_chemical_absorption_of_oxygen_in_sewage.htm, свободный.
41. *Holmes D.E., Dang Y., Smith J.A.* Chapter Four – Nitrogen cycling during wastewater treatment // *Advances in Applied Microbiology* V. 106 / Ed. by G.M. Gadd, S. Sariaslani. – Acad. Press, 2019. – P. 113–192. – doi: 10.1016/bs.aambs.2018.10.003.
42. *Коркина О.С., Сарпулова Г.И., Жданова Г.О., Горбунова Ю.О., Иванчиков Е.А., Стом Д.И., Бешков В.Н.* Микробиологический препарат «Доктор Робик 109» как биоагент для получения электрического тока в МТЭ при добавлении жиров // *Изв. Иркут. гос. ун-та. Сер. Биология. Экология*. – 2019. – Т. 28. – С. 17–25. – doi: 10.26516/2073-3372.2019.28.17.
43. *Стом Д.И., Жданова Г.О., Алферов С.В., Юдина Н.Ю., Чеснокова А.Н., Толстой М.Ю., Купчинский А.Б., Саксонов М.Н., Энхдул Т., Францетти А., Рахимнеджад М.* Комплексный биопрепарат «Доктор Робик» как биоагент для утилизации фитомассы водных растений в биотопливных элементах // *Изв. вузов. Прикл. химия и биотехнология*. – 2022. – Т. 22, № 1. – С. 50–63 – doi: 10.21285/2227-2925-2022-12-1-50-63.
44. *Rudenko R.R., Vasilevich E.E., Zhdanova G.O., Chizhick K.I., Topchiy I.A., Stom D.I.* The use of urban sewage sludge as a substrate in a microbial fuel cell // *Int. J. Eng. Technol.* – 2018. – V. 7, No 2.23. – P. 277–280. – doi: 10.14419/ijet.v7i2.23.11931.

Поступила в редакцию
22.02.2022

Жданова Галина Олеговна, научный сотрудник

Иркутский государственный университет
ул. Карла Маркса, д. 1, г. Иркутск, 664003, Россия
E-mail: zhdanova86@ya.ru

Стом Дэвард Иосифович, доктор биологических наук, профессор кафедры зоологии позвоночных и экологии; преподаватель кафедры инженерных коммуникаций и систем жизнеобеспечения; главный научный сотрудник

Иркутский государственный университет
ул. Карла Маркса, д. 1, г. Иркутск, 664003, Россия
Иркутский национальный исследовательский технический университет
ул. Лермонтова, д. 83, г. Иркутск, 664003, Россия
Байкальский музей СО РАН
ул. Академическая, д. 1, п. Листвянка, Иркутская обл., 664520, Россия
E-mail: *stomd@mail.ru*

Юдина Наталья Юрьевна, кандидат химических наук, старший научный сотрудник

Тульский государственный университет
пр-т Ленина, д. 92, г. Тула, 300012, Россия
E-mail: *tysia21-05-90@mail.ru*

Алферов Сергей Валерьевич, кандидат химических наук, заведующий лабораторией

Тульский государственный университет
пр-т Ленина, д. 92, г. Тула, 300012, Россия
E-mail: *chem@tsu.tula.ru*

Джангидзе Заза Ушангович, кандидат технических наук, доцент кафедры водоснабжения и водоотведения

Московский государственный строительный университет
Ярославское шоссе, д. 26, г. Москва, 129337, Россия
E-mail: *d_zaza@mail.ru*

Стом Алина Дэвардовна, кандидат биологических наук, ведущий инженер

Иркутский государственный университет
ул. Карла Маркса, д. 1, г. Иркутск, 664003, Россия
E-mail: *apatania@yandex.ru*

Толстой Михаил Юрьевич, кандидат технических наук, заведующий кафедрой инженерных коммуникаций и систем жизнеобеспечения, директор инновационного центра «Энергоэффективность», научный руководитель лаборатории качества воды

Иркутский национальный исследовательский технический университет
ул. Лермонтова, д. 83, г. Иркутск, 664003, Россия
E-mail: *tolstoi@istu.edu*

Богданова Ирина Анатольевна, старший преподаватель кафедры геологии нефти и газа

Иркутский государственный университет
ул. Карла Маркса, д. 1, г. Иркутск, 664003, Россия
E-mail: *irinairk@gmail.com*

Чеснокова Александра Николаевна, кандидат химических наук, доцент кафедры химии и биотехнологии

Иркутский национальный исследовательский технический университет
ул. Лермонтова, д. 83, г. Иркутск, 664003, Россия
E-mail: *chesnokova@istu.edu*

**Generation of Electricity in BFC
by the Biological Product “Doctor Robik” during the Purification
of Nitrogen-Containing Wastewater**

G.O. Zhdanova^{a*}, D.I. Stom^{a,b,c,**}, N.Yu. Yudina^{d***}, S.V. Alferov^{d****},
Z.U. Dzhangidze^{e*****}, A.D. Stom^{a*****}, M.Yu. Tolstoy^{b*****},
I.A. Bogdanova^{a*****}, A.N. Chesnokova^{b*****}

^aIrkutsk State University, Irkutsk, 664003 Russia

^bIrkutsk National Research Technical University, Irkutsk, 664074 Russia

^cBaikal Museum, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences,
Listvyanka, Irkutsk region, 664520 Russia

^dTula State University, Tula, 300012 Russia

^eMoscow State University of Civil Engineering, Moscow, 129337 Russia

E-mail: *zhdanova86@ya.ru, **stomd@mail.ru, ***tysia21-05-90@mail.ru,

****chem@tsu.tula.ru, *****d_zaza@mail.ru, *****apatania@yandex.ru,

*****tolstoi@istu.edu, *****irinairk@gmail.com, *****chesnokova@istu.edu

Received February 22, 2022

Abstract

In this study, we evaluated the efficiency of a biofuel cell technology (BFC) based on the commercial biological product “Doctor Robik 109” in the utilization of some nitrogen-containing components of wastewater (urea, ammonium nitrogen, and peptone). The following electrochemical parameters were measured during the BFC operation with “Doctor Robik 109”: voltage, current strength, power, and redox potential of the anolyte. The nitrogen-containing substrates were determined using photometric methods. The number of microorganisms was calculated by Koch’s method. It was shown that “Doctor Robik 109” generated an electric current in the BFC upon the usage of urea (0.5 g/L), ammonium nitrogen (0.5 g/L of NH_4^+ ions), and peptone (0.5 g/L) as substrates. The current generation by microorganisms of “Doctor Robik 109” in the BFC was accompanied by an increase in the number of cells of microorganisms, a depletion of the tested substrates, and a decrease in the redox potential of the anolyte. In the BFC containing model wastewater with the addition of 0.5 g/L of urea, “Doctor Robik 109” generated an open-circuit voltage of up to 332 mV (for 5 days). With 0.5 g/L NH_4^+ and 0.5 g/L peptone, this value was higher – up to 483 mV (for 1 day) and up to 520 mV (for 10 days), respectively. The current strength (in the short-circuit mode) in the BFC with urea reached 519 μA , and in the BFC with peptone it was more than two times higher (up to 1248 μA). Based on the data obtained, with an account of the breadth of the substrate specificity of microorganisms of “Doctor Robik 109”, its low cost and ease of use, recommendations were given for the use of this biological product in BFC for waste disposal and treatment of various types of wastewater with simultaneous generation of electric current.

Keywords: biofuel cells, generation of electric current, bioagent microorganisms, biological products, “Doctor Robik”, nitrogen-containing wastewater, wastewater treatment

Acknowledgments. This study was supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation as part of the state assignment in the field of research (project no. FEWG-2021-0013).

Figure Captions

- Fig. 1 Dynamics of voltage (a) and current strength (b) generated in the BFC by the microbial preparation "Doctor Robik 109" when using urea (medium – model wastewater, electrodes – carbon cloth, urea concentration – 0.5 g/L).
- Fig. 2. Dynamics of the number of viable cells of the microbial preparation "Doctor Robik 109" and the concentration of urea in the BFC anolyte during its operation (medium – model wastewater, electrodes – carbon cloth, urea concentration - 0.5 g/L).
- Fig. 3. Dynamics of voltage (a) and change in the concentration of ammonium nitrogen (b) in the BFC under the action of the microbial preparation "Doctor Robik 109" (medium – model wastewater, initial content of NH_4^+ – 0.5 g/L (in the form of NH_4Cl), electrodes – carbon cloth).
- Fig. 4. Dynamics of voltage (a) and current strength (b) generated in the BFC by the microbial preparation "Doctor Robik 109" when using peptone (medium – model wastewater, electrodes – carbon cloth, peptone concentration – 0.5 g/L).
- Fig. 5. Dynamics of the redox potential of the BFC anolyte containing the native and inactivated microbial preparation "Doctor Robik 109" as a bioagent (medium – model wastewater, electrodes – carbon cloth, peptone concentration – 0.5 g/L).
- Fig. 6. Changes in the indicator of chemical oxygen consumption of the anolyte of the studied BFCs (native and autoclaved preparation "Doctor Robik 109", medium – model wastewater, substrate – peptone 0.5 g/L).
- Fig. 7. Dependence of the power of the BFC with the microbial preparation "Doctor Robik 109" on external resistance (medium – model wastewater, substrate – peptone 0.5 g/L, electrodes – carbon cloth, BFC exposure time – 2 days).
- Fig. 8. Dependence of the power of the BFC with the microbial preparation "Doctor Robik 109" for two days of exposure, on external resistance (medium – model wastewater, substrate – sodium acetate 0.5 g/L + urea 0.5 g/L, electrodes – carbon cloth).

References

1. Konovalova E.Yu., Stom D.I., Zhdanova G.O., Yuriev D.A., Li Y., Barбора L., Goswami P. The microorganisms used for working in microbial fuel cells. *AIP Conf. Proc.*, 2018, vol. 1952, art. 020017, pp. 1–10. doi: 10.1063/1.5031979.
2. Badea S.L., Enache S., Tamaian R., Niculescu V.-C., Varlam M., Pirvu C.-V. Enhanced open-circuit voltage and power for two types of microbial fuel cells in batch experiments using *Saccharomyces cerevisiae* as biocatalyst. *J. Appl. Electrochem.*, 2019, vol. 49, no. 1, pp. 17–26. doi: 10.1007/s10800-018-1254-7.
3. Dai H.N., Nguyen T.-A. D., My LE L.-Ph., Tran M.V., Lan T.-H., Wang Ch.-T. Power generation of *Shewanella oneidensis* MR-1 microbial fuel cells in bamboo fermentation effluent. *Int. J. Hydrogen Energy*, 2021, vol. 46, no. 31, pp. 16612–16621. doi: 10.1016/j.ijhydene.2020.09.264.
4. Choudhury P., Uday U.Sh.P., Bandyopadhyay T.K., Ray R.N., Bhunia B. Performance improvement of microbial fuel cell (MFC) using suitable electrode and Bioengineered organisms: A review. *Bioengineered*, 2017, vol. 8, no. 5, pp. 471–487. doi: 10.1080/21655979.2016.1267883.
5. Ren J., Li N., Du M., Zhang Y., Hao Ch., Hu R. Study on the effect of synergy effect between the mixed cultures on the power generation of microbial fuel cells. *Bioengineered*, 2021, vol. 12, no. 1, pp. 844–854. doi: 10.1080/21655979.2021.1883280.
6. Jadhav D.A., Ghangrekar M.M. Optimising the proportion of pure and mixed culture in inoculum to enhance the performance of microbial fuel cells. *Int. J. Environ. Technol. Manage.*, 2020, vol. 23, no. 1, pp. 50–67. doi: 10.1504/IJETM.2020.110159.
7. Lai M.-F., Lou Ch.-W., Lin J.-H. 3D composite electrodes of microbial fuel cells used in livestock wastewater: Evaluations of coating and performance. *Int. J. Hydrogen Energy*, 2017, vol. 42, no. 45, pp. 27666–27676. doi: 10.1016/j.ijhydene.2017.07.021.
8. Xin Sh., Shen J., Liu G., Chen Q., Xiao Zh., Zhang G., Xin Y. High electricity generation and COD removal from cattle wastewater in microbial fuel cells with 3D air cathode employed non-precious Cu_2O /reduced graphene oxide as cathode catalyst. *Energy*, 2020, vol. 196, art. 117123, pp. 1–10. doi: 10.1016/j.energy.2020.117123.

9. Sreelekshmy B.R., Basheer R., Sivaraman S., Vasudevan V., Elias L., Shibli S.M.A. Sustainable electric power generation from live anaerobic digestion of sugar industry effluents using microbial fuel cells. *J. Mater. Chem. A*, 2020, vol. 8, no. 12, pp. 6041–6056. doi: 10.1039/D0TA00459F.
10. Tessema T.D., Yemata T.A. Experimental dataset on the effect of electron acceptors in energy generation from brewery wastewater via a microbial fuel cell. *Data Brief*, 2021, vol. 37, art. 107272, pp. 1–10. doi: 10.1016/j.dib.2021.107272.
11. Pugazhendi A., Al-Mutairi A.E., Jamal M.T., Jeyakumar R.B., Palanisamy K. Treatment of sea-food industrial wastewater coupled with electricity production using air cathode microbial fuel cell under saline condition. *Int. J. Energy Res.*, 2020, vol. 44, no. 15, pp. 12535–12545. doi: 10.1002/er.5774.
12. Elakkiya E., Niju S. Bioelectrochemical treatment of real-field bagasse-based paper mill wastewater in dual-chambered microbial fuel cell. *3 Biotech*, 2021, vol. 11, no. 2, art. 42, pp. 1–10. doi: 10.1007/s13205-020-02606-6.
13. Narayan M., Solanki P., Rabha A.K., Srivastava R.K. Treatment of pulp and paper industry effluent and electricity generation by constructed wetland coupled with microbial fuel cell (CW-MFC). *J. Pharmacogn. Phytochem.*, 2018, vol. 7, no. 6, pp. 493–498.
14. Sarmin S., Ideris A.B., Ethiraj B., Islam M.A., Yee Ch.S., Khan Md.M.R. Potentiality of petrochemical wastewater as substrate in microbial fuel cell. *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.*, 2020, vol. 736, no. 3, art. 032015, pp. 1–10. doi: 10.1088/1757-899X/736/3/032015.
15. Sarmin S., Ethiraj B., Islam M.A., Ideris A., Yee Ch.S., Khan Md.M.R. Bio-electrochemical power generation in petrochemical wastewater fed microbial fuel cell. *Sci. Total Environ.*, 2019, vol. 695, art. 133820, pp. 1–11. doi: 10.1016/j.scitotenv.2019.133820.
16. Ilamathi R., Jayapriya J. Microbial fuel cells for dye decolorization. *Environ. Chem. Lett.*, 2018, vol. 16, no. 1, pp. 239–250. doi: 10.1007/s10311-017-0669-4.
17. Miran W., Jang J., Nawaz M., Shahzad A., Lee D.S. Sulfate-reducing mixed communities with the ability to generate bioelectricity and degrade textile diazo dye in microbial fuel cells. *J. Hazard. Mater.*, 2018, vol. 352, pp. 70–79. doi: 10.1016/j.jhazmat.2018.03.027.
18. Feng C., Tsai Ch.-Ch., Ma Ch.-Y., Yu Ch.-P., Hou Ch.-H. Integrating cost-effective microbial fuel cells and energy-efficient capacitive deionization for advanced domestic wastewater treatment. *Chem. Eng. J.*, 2017, vol. 330, pp. 1–10. doi: 10.1016/j.cej.2017.07.122.
19. Stager J.L., Zhang X., Logan B.E. Addition of acetate improves stability of power generation using microbial fuel cells treating domestic wastewater. *Bioelectrochemistry*, 2017, vol. 118, pp. 154–160. doi: 10.1016/j.bioelechem.2017.08.002.
20. Kuznetsov A.V., Khorina N.N., Konovalova E.Yu., Amsheev D.Yu., Pomamoreva O. N., 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 Environ. Sci.*, 2021, vol. 808, art. 012038, pp. 1–7. doi: 10.1088/1755-1315/808/1/012038.
21. Goenka R., Mukherji S., Ghosh P.C. Characterization of electrochemical behaviour of *Escherichia coli* MTCC 1610 in a microbial fuel cell. *Bioresour. Technol. Rep.*, 2018, vol. 3, pp. 67–74. doi: 10.1016/j.biteb.2018.06.002.
22. García-Mayagoitia S., Fernández-Luqueño F., Morales-Acosta D., Carrillo-Rodríguez J.C., García-Lobato M.A., de la Torre-Saenz L., Alonso-Lemus I.L., Rodríguez-Varela F.J. Energy generation from pharmaceutical residual water in microbial fuel cells using ordered mesoporous carbon and *Bacillus subtilis* as bioanode. *ACS Sustainable Chem. Eng.*, 2019, vol. 7, no. 14, pp. 12179–12187. doi: 10.1021/acssuschemeng.9b01281.
23. Cheng P., Shan R., Yuan H.-R., Shen W., Chen Y. Bioelectricity generation from the salinomycin-simulated livestock sewage in a *Rhodococcus pyridinivorans* inoculated microbial fuel cell. *Process Saf. Environ. Prot.*, 2020, vol. 138, pp. 76–79. doi: 10.1016/j.psep.2020.03.003.
24. Cao Y., Mu H., Liu W., Zhang R., Guo J., Xian M., Liu H. Electricigens in the anode of microbial fuel cells: Pure cultures versus mixed communities. *Microb. Cell Fact.*, 2019, vol. 18, art. 39, pp. 1–14. doi: 10.1186/s12934-019-1087-z.
25. Islam M.A., Ong H.R., Ethiraj B., Cheng Ch.K., Khan M.M.R. Optimization of co-culture inoculated microbial fuel cell performance using response surface methodology. *J. Environ. Manage.*, 2018, vol. 225, pp. 242–251. doi: 10.1016/j.jenvman.2018.08.002.

26. Islam M.A., Ethiraj B., Cheng Ch. K., Yousuf A., Khan Md.M.R. An insight of synergy between *Pseudomonas aeruginosa* and *Klebsiella varitcola* in a microbial fuel cell. *ACS Sustainable Chem. Eng.*, 2018, vol. 6, no. 3, pp. 4130–4137. doi: 10.1021/acssuschemeng.7b04556.
27. Wang C.-T., Sangeetha T., Zhao F., Garg A., Chang C.-T., Wang C.-H. Sludge selection on the performance of sediment microbial fuel cells. *Int. J. Energy Res.*, 2018, vol. 42, pp. 4250–4255. doi: 10.1002/er.4168.
28. He J., Xin X., Pei Zh., Chen L., Chu Zh., Zhao M., Wu X., Li B., Tang X., Xiao X. Microbial profiles associated improving bioelectricity generation from sludge fermentation liquid via microbial fuel cells with adding fruit waste extracts. *Bioresour. Technol.*, 2021, vol. 337, art. 125452, pp. 1–9. doi: 10.1016/j.biortech.2021.125452.
29. Almatouq A., Babatunde A.O., Khajah M., Webster G., Alfodari M. Microbial community structure of anode electrodes in microbial fuel cells and microbial electrolysis cells. *J. Water Process Eng.*, 2020, vol. 34, art. 101140, pp. 1–10. doi: 10.1016/j.jwpe.2020.101140.
30. Heber A.J., Ni J., Sutton A.L., Patterson J.A., Fakhoury K.J., Kelly D.T., Shao P. *Laboratory testing of commercial manure additives for swine odor control (Final Report)*. Ames, IA, USDA-ARS-Natl. Swine Res. Inf. Cent., 2001. 198 p.
31. Ignatavičius G., Oškinis V. Investigation of black oil and diesel biodegradation in water. *Ekologija*, 2007, vol. 53, no. 4, pp. 90–94.
32. Skaisgiriene A., Vaitiekūnas P., Zabukas V. Influence of chlorides and sulphates on quality of biological wastewater treatment using enzyme preparations. *J. Environ. Eng. Landscape Manage.*, 2004, vol. 12, no. 3, pp. 91–95. doi: 10.1080/16486897.2004.9636825.
33. Stom D.I., Zhdanova G.O., Kashevskii A.V. New designs of biofuel cells and testing of their work. *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.*, 2017, vol. 262, art. 012219, pp. 1–6. doi: 10.1088/1757-899X/262/1/012219.
34. State Standard 32509-2013. Surface-active agents. Method for determination of biodegradability rate in aquatic environment. Moscow, Standartinform, 2019. 26 p. (In Russian)
35. Grigorova R., Norris J.R. (Eds.) *Methods in Microbiology*. Vol. 22: Techniques in microbial ecology. Acad. Press, 1990. 627 p.
36. Basova E.M., Bulanova M.A., Ivanov V.M. Photometric detection of urea in natural waters. *Moscow Univ. Chem. Bull.*, 2011, vol. 66, no. 6, pp. 345–350. doi: 10.3103/S0027131411060022.
37. Hosoney R.C., Finney K.F. Spectrophotometric determination of urea, thiourea, and certain of their substitution products with *p*-dimethylaminobenzaldehyde and diacetylmonoxime. *Anal. Chem.*, 1964, vol. 36, no. 11, pp. 2145–2148. doi: 10.1021/ac60217a034.
38. RD 52.24.486-2009. Mass concentration of ammonia and ammonium ions in waters. Methodology for performing measurements by the photometric method with Nessler's reagent. Rostov-on-Don, 2009. 21 p. (In Russian)
39. Netrusov A.I., Egorova M.A., Zakharchuk L.M. *Praktikum po mikrobiologii* [A Practical Course in Microbiology]. Netrusov A.I. (Ed.). Moscow, Akademiya, 2005. 608 p. (In Russian)
40. Belen'kaya S.L., Popova Yu.I., Kalitvyanskaya V.I. Determination of COD in wastewater. Available at: http://www.sergey-osetrov.narod.ru/Documents/How_to_define_chemical_absorption_of_oxygen_in_sewage.htm. (In Russian)
41. Holmes D.E., Dang Y., Smith J.A. Chapter Four – Nitrogen cycling during wastewater treatment. In: Gadd G.M., Sariaslani S. (Eds.) *Advances in Applied Microbiology*. Vol. 106. Acad. Press, 2019, pp. 113–192. doi: 10.1016/bs.aambs.2018.10.003.
42. Korkina O.S., Sarapulova G.I., Zhdanova G.O., Gorbunova Yu.O., Ivanchikov E.A., Stom D.I., Beschkov V.N. Microbiological preparation “Doctor Robik 109” as a bioagent for obtaining electrical current in MFC with the addition of fats. *Izv. Irkutsk. Gos. Univ. Ser.: Biol. Ekol.*, 2019, vol. 28, pp. 17–25. doi: 10.26516/2073-3372.2019.28.17. (In Russian)
43. Stom D.I., Zhdanova G.O., Alferov S.V., Yudina N.Yu., Chesnokova A.N., Tolstoy M.Yu., Kupchinsky A.B., Saksonov M.N., Enkhdul T., Franzetti A., Rahimnejad M. The “Doctor Robik 109” complex biopreparation as a bioagent for utilizing aquatic plant phytomass in biofuel cells. *Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Prikl. Khim. Biotekhnol.*, 2022, vol. 22, no. 1, pp. 50–63. doi: 10.21285/2227-2925-2022-12-1-50-63. (In Russian)

44. Rudenko R.R., Vasilevich E.E., Zhdanova G.O., Chizhick K.I., Topchiy I.A., Stom D.I. The use of urban sewage sludge as a substrate in a microbial fuel cell. *Int. J. Eng. Technol.*, 2018, vol. 7, no. 2.23, pp. 277–280. doi: 10.14419/ijet.v7i2.23.11931.

Для цитирования: Жданова Г.О., Стом Д.И., Юдина Н.Ю., Алферов С.В., Джангидзе З.У., Стом А.Д., Толстой М.Ю., Богданова И.А., Чеснокова А.Н. Генерирование электричества в БТЭ биопрепаратом «Доктор Робик» при очистке азотсодержащих сточных вод // Учен. зап. Казан. ун-та. Сер. Естеств. науки. – 2022. – Т. 164, кн. 2. – С. 279–296. – doi: 10.26907/2542-064X.2022.2.279-296.

For citation: Zhdanova G.O., Stom D.I., Yudina N.Yu., Alferov S.V., Dzhangidze Z.U., Stom A.D., Tolstoy M.Yu., Bogdanova I.A., Chesnokova A.N. Generation of electricity in BFC by the biological product “Doctor Robik” during the purification of nitrogen-containing wastewater. *Uchenye Zapiski Kazanskogo Universiteta. Seriya Estestvennyye Nauki*, 2022, vol. 164, no. 2, pp. 279–296. doi: 10.26907/2542-064X.2022.2.279-296. (In Russian)