

Химическая ТЕХНОЛОГИЯ



Производственный, научно-технический, информационно-аналитический и учебно-методический журнал

Орган Научного совета РАН по химической технологии

Рекомендован ВАК для публикации результатов диссертаций на соискание ученых степеней кандидата и доктора наук

Журнал переводится на английский язык и выпускается издательством "Pleiades Publishing, Ltd." в виде приложений к журналу "Theoretical Foundations of Chemical Engineering", распространение которого осуществляет издательство "Springer".

Переводная версия журнала входит в международные реферативные базы данных систем цитирования (индексирования): Academic OneFile, Academic Search, ChemWeb, Chemical Abstracts Service (CAS), Computing and Technology, Current Contents/Engineering, EBSCO, El-Compendex, GeoRef, Google Scholar, INIS Atomindex, INSPEC, Journal Citation Reports/Science Edition, OCLC, SCImago, SCOPUS, Science Citation Index Expanded.

Русскоязычная версия журнала включена в базу Russian Science Citation Index (RSCI) на платформе Web of Science.



Том 24

Издается с января 2000 г.

СОДЕРЖАНИЕ

ТЕХНОЛОГИЯ НЕОРГАНИЧЕСКИХ ВЕЩЕСТВ И МАТЕРИАЛОВ

Фролова Е.А., Кондаков Д.Ф., Данилов В.П. Противогололедные свойства композиций из нитрата кальция, этанола и воды при температурах ниже нуля градусов Цельсия 162

ТЕХНОЛОГИЯ ОРГАНИЧЕСКИХ ВЕЩЕСТВ

Мелешенкова В.В., Кузнецов Д.Н., Караваева Е.Б., Кобраков К.И. Новые азокрасители на основе 2-метилрезорцина для поликапроамидных волокон 165

ТЕХНОЛОГИЯ ПОЛИМЕРНЫХ И КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

Петров Н.С., Бабкин О.Э., Ильина В.В. Ингибирование спонтанной полимеризации при синтезе эпоксиакрилового олигомера 171

ХИМИКО-МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ ГЛУБОКОЙ ПЕРЕРАБОТКИ РУДНОГО, ТЕХНОГЕННОГО И ВТОРИЧНОГО СЫРЬЯ

Майоров Д.В., Маслова М.В. Исследование кинетики процесса кислотного разложения эвдиалита 177

Макарян И.М., Князян Н.Б., Назарян Э.М., Арустамян А.Г., Агамян Э.С., Акопян А.А. Способ переработки перлита 189

ПРОЦЕССЫ И АППАРАТЫ ХИМИЧЕСКОЙ ТЕХНОЛОГИИ

Штепа В.Н., Киреев С.Ю., Козырь А.В., Шикунец А.Б. Безреагентная технология интенсификации процесса выращивания микрозелени в аквапонных системах 194

УДК 66.087

Безреагентная технология интенсификации процесса выращивания микрозелени в аквапонных системах

В. Н. Штепа¹, д-р техн. наук; С. Ю. Киреев^{2*}, д-р техн. наук; А. В. Козырь¹; А. Б. Шикунец¹

¹Полесский государственный университет, г. Пинск, Брестская область, 225710, Республика Беларусь

²Пензенский государственный университет, Пенза, 440026, Россия

*E-mail: Dean_fptet@pnzgu.ru

DOI: 10.31044/1684-5811-2023-24-5-194-200

Поступила в редакцию 04.11.2022

После доработки 14.11.2022

Принята к публикации 17.11.2022

Проведена оценка текущей ситуации с точки зрения мировой продовольственной безопасности, которая возникает в результате новых вызовов, для достижения целей устойчивого развития ООН. В настоящее время аквапонные технологии считаются достаточно перспективными для обеспечения региональных потребителей продуктами питания (гидробионтами и фитопродуктами). Проанализированы безреагентные технологии интенсификации роста и развития растений (электромагнитное воздействие, ультразвуковые волны, коронный разряд). Обосновано использование установок электролизной обработки водных растворов для выращивания гидробионтов перед их подачей в гидропонные модули. Результаты свидетельствуют о значительном увеличении урожайности растений более чем на 30% после электрохимической обработки. Проанализированы изменения гидрохимических и гидрофизических свойств воды после электролиза. Предложена и верифицирована схема аквапонной системы для интенсификации безреагентного электролиза растущих микрозеленых растений. Обосновано, что дальнейшие исследования должны быть направлены на построение систем управления технологическими процессами в аквапонных установках и создание специализированных энергоэффективных источников питания постоянного тока.

Ключевые слова: безреагентная технология, аквапонные системы, электролиз, фитопродукты, гидробионты, интенсификация.

Введение

Фактически с началом 2019 года глобальная рецессия, вызванная пандемией COVID-19, лишила средств к существованию, особенно в беднейших странах, женщин и наиболее уязвимые и подвергающиеся дискриминации категории населения, в том числе в бедных городских районах и тех, кто работает в неформальном секторе [1]. Более 200 стран и территорий в различных условиях расширили меры социальной защиты, потратив на смягчение этих последствий около 750 млрд \$ USA. Ключевым негативным последствием стала проблема в недостаточном обеспечении продуктами питания населения планеты, что является достаточно насущным вопросом даже в эпоху, когда большинство развитых и развивающихся стран не считает добычу еды проблемой: в США, Великобритании, России и Израиле даже появляются *food-tech*-проекты, которые сокращают затрачиваемые усилия на покупку еды до минимума [2]. Тем не менее, по данным ООН, около одной десятой части населения планеты на сегодняшний день недоедает. Ситуация крайне усугубляется на фоне

современного общемирового военно-политического кризиса.

Соответственно, научно-технологические разработки, нацеленные на решение цели устойчивого развития ООН («Цель 2. Ликвидация голода, обеспечение продовольственной безопасности и улучшение питания и содействие устойчивому развитию сельского хозяйства»), имеют весомую планетарную актуальность.

Именно для формирования региональной продовольственной безопасности можно использовать аквапонные установки. Прежде всего, на территориях, где земледелие характеризуется как «рисковое». Такие технологические комплексы представляют собой искусственную экосистему, в которой ключевыми являются три типа живых организмов: водные животные (обычно рыбы), растения и бактерии.

Установки функционируют по синергетическому принципу: рыбы обеспечивают питательный базис растениям, бактерии трансформируют полезные вещества для флоры, а представители последней очищают воду [3, 4]. Кормление гидробионтов обеспечивает постоянный приток питательных веществ в систему аквапоники, что делает ненужным добавление гидропонных питательных растворов. При этом в аквакультуре до 70–75% кормов уходит в отходы в твердой, растворенной или газообразной форме. Следовательно, концентрации питательных веществ в закрытых рециркуляционных системах с потреблением воды менее 2% могут достигать уровней, аналогичных таковым в специализированных гидропонных питательных растворах.

Цель работы — разработка безреагентной технологии интенсификации процесса выращивания микрозелени в гидропонных системах, позволяющей повысить урожайность с единицы площади или объема оборудования без дополнительного загрязнения водных растворов, что обеспечит повы-

шение технико-экономических показателей технологических комплексов.

Анализ исследований других авторов

Проблеме разработки технологий безреагентной и малоотходной очистки сточных вод или жидких отходов производства в последние годы уделяется большое внимание. Предлагаются способы физического и физико-химического воздействия, позволяющие снижать концентрации загрязняющих компонентов [5–8].

Важными причинами, сдерживающими повышение урожайности агротехнических культур, считаются низкая всхожесть, высокая восприимчивость сортов к болезням и вредителям, слабая энергия прорастания семян из-за их твердокаменности, недостаточная эффективность освоения питательных компонентов из разного рода сред, включая и водную среду. Для эффективного преодоления отмеченных недостатков необходимо использование современных высокоэффективных технологий подготовки растений, посевного материала и сред выращивания, которые обеспечивают устранение указанных недостатков.

К таким решениям относятся электротехнические комплексы, использующие магнитные устройства для изменения свойств воды, которая может эффективно применяться в системах полива и орошения различных сельскохозяйственных культур [9]. При этом параметры и конструкция устройств для омагничивания воды оказывают существенное влияние на развитие и урожайность возделываемых растений. Исследование различных вариантов использования электромагнитов позволило установить преимущества при выращивании различных сельскохозяйственных культур с улучшением итоговых показателей при более высоких параметрах магнитной индукции и увеличении зоны действия магнитного поля на подаваемую воду.

Ультразвуковая обработка зерна и семян перед посадкой интенсифицирует процесс прорастания, повышает урожайность различных культур в среднем на 20—40% [10]. После воздействия ультразвуковыми волнами зерна ячменя дают всходы на 2—3 дня раньше, чем контрольные посадки, длина колоса и количество зерен в нем увеличиваются на 30%, количество стеблей от одного зерна также увеличивается на 25—30%.

Большой практический и теоретический интерес представляет предпосевная обработка семян в электрическом поле коронного разряда [11]. Она позволяет повысить продуктивность растений путем улучшения посевных качеств семенного материала. Ионизация поверхностных атомов ионообменных субстратов усиливает ионообменные свойства и насыщает субстрат электронами, необходимыми растениям для усвоения неорганических питательных элементов. При этом электроразрядка ионообменных субстратов проводится именно в поле коронного разряда.

Известны исследования по интенсификации анаэробной переработки органических отходов путем их предварительной электролизной обработки с использованием нерастворимых электродов [12, 13]. Полученные результаты позволили ускорить выход заданного объема биогаза до 40% (при более высоком качестве горючих компонентов), используя интенсификацию биохимической переработки сбраживаемого субстрата.

Исходя из компактности блоков электролизной обработки и относительной возможности полной автоматизации технологических процессов, целесообразно провести экспериментальное исследование электрохимической обработки водного раствора аквапонных систем перед поступлением их на гидропонный модуль по выращиванию микрорзелени.

Экспериментальная часть

В рамках исследований был создан экспериментальный бездиафрагменный электролизный модуль, который включает (рис. 1): электродную часть; электрическую периферию; запорную арматуру.

Роль электродов (анода и катода) выполнял бой графита, размещенный в пластиковых коробах.

Электрический режим обработки: 2 Ампера (постоянный ток), 48 Вольт.

В качестве объекта выращивания был выбран клариевый сом (*Clarias gariepinus*) средней массой особей 35 г поскольку такой гидробионт имеет мелкодисперсные экскременты, которые сложно подвергаются фильтрации. Плотность посадки составила 100 кг/м³. Объем рыбоводной емкости — 80 литров, таким образом, емкость была зарыблена 8 кг клариевого сома. Кормление производилось комбикормом производства ОАО «Жабинковский комбикормовый завод» марки КО 112-3, с массовой долей протеина не менее 33%.

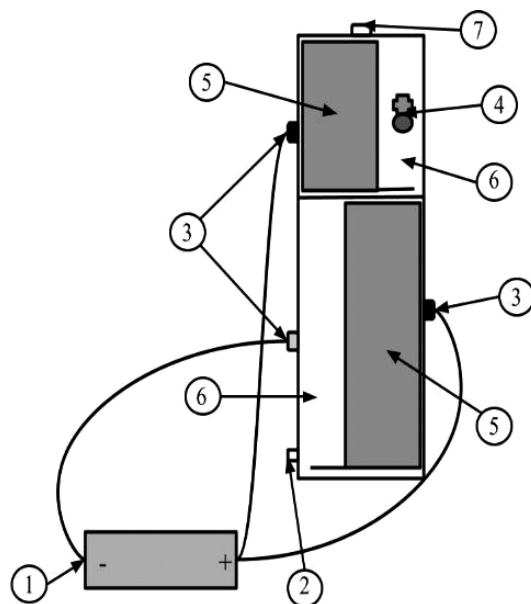


Рис. 1. Схема электролизного блока обработки водного раствора аквапонной системы:

1 — источник питания постоянного тока; 2 — входной кран; 3 — токоподводы; 4 — кран для отбора проб; 5 — анодные зоны; 6 — катодные зоны; 7 — выходной кран

В опытной системе в гидропонный модуль аквапонной системы, работающей по технологии *NFT* (*Nutrient Film Technique*), с субстратом в виде геотекстиля из нетканого материала, высадили 100 грамм семян горчицы. В системе использовались полноспектральные фитосветильники мощностью 18 Вт. Первые 2-е суток семена находились в темноте, далее цикл освещения составлял 8 часов. К гидропонному модулю был подключен пластиковый мембранный электролизер. Электролизная обработка проводилась на протяжении 120 минут 6 раз в сутки.

Цикл выращивания от сухого семени до готовой продукции микрозелени горчицы составляет 9 суток, именно столько проводились эксперименты. После созревания оценивалось качество зелени, процент всхожести и зеленая масса продукта. Оценивалась корневая система, а также геотекстиль проверялся на наличие гнили и плесени.

Для проведения гидрохимического контроля водный раствор отбирался из рыбоводных емкостей, также контроль велся после электролизной обработки и прохождения гидропонного модуля. Далее для оценки влияния электролизных процессов на аквапонную установку был

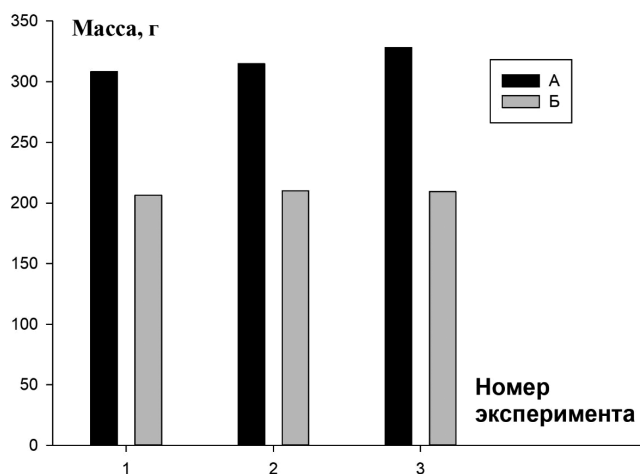


Рис. 2. Сравнения выхода по растениям в срезанном виде: А — с электролизной обработкой водного раствора; Б — без использования электролизной обработки

проведен контрольный опыт по выращиванию клариевого сома и микрозелени горчицы, но без использования электролизного блока. Плотности посадки, навеска сома, корма и технология выращивания была идентична, в гидропонный модуль также было высажено 100 грамм сухих семян горчицы, условия выращивания фитопродукции были одинаковыми. В данной системе контроль за гидрохимическими показателями воды велся из рыбоводных емкостей и после прохождения гидропонного модуля.

Результаты и их обсуждение

В результате безреагентной электролизной обработки водного раствора был зафиксирован прирост горчицы: по сравнению с контролем относительный среднеарифметический прирост составил 34,16% (рис. 2).

Оценка полученных результатов однозначно демонстрирует весомый технологический эффект. При этом в работе исследовали зависимости кислотности среды pH, окислительно-восстановительного потенциала E , общей минерализации, концентрации аммиака/аммония ($\text{NH}_3/\text{NH}_4^+$), светопропускаемости от времени эксперимента в сравнении с технологиями без электролизной обработки.

При электрохимическом воздействии pH был ниже, чем в контроле — разница достигала 1,45 (в соответствующие дни) (рис. 3).

Касательно окислительно-восстановительного потенциала, то будучи более отрицательным в контроле он имел «более комфортные» для растений значения, а с 7-го дня опытов располагался в отрицательной области (рис. 4).

Интерес представляет то, что общая минерализация при первом же электролизном воздействии значительно снижается (на 65,4% по сравнению с контролем) и потом демонстрирует трендовую линейную стабильность (рис. 5).

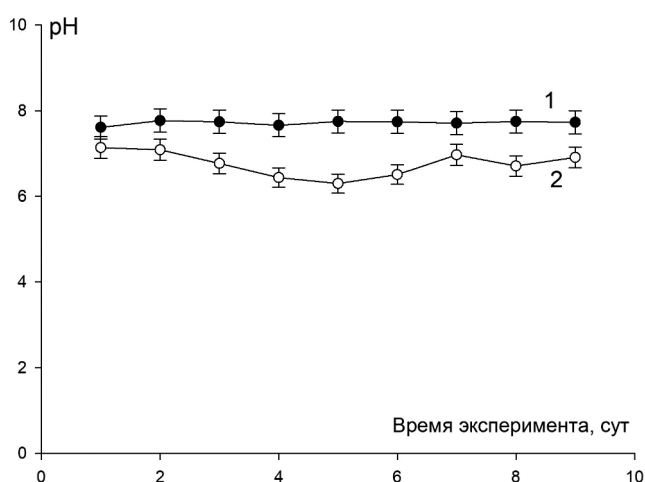


Рис. 3. Изменение pH водного раствора аквапонной системы при разных способах выращивания горчицы: 1 — без электролитической обработки; 2 — с электролитической обработкой

При этом мониторинг концентрации аммиака/аммония ($\text{NH}_3/\text{NH}_4^+$) продемонстрировал его падение до нуля при электролитической обработке при дальнейшем небольшом росте со стабилизацией на 6-й день исследований на значениях 2 мг/л; в то же время в контроле был системный рост такого показателя до 7 мг/л (рис. 6).

Исходя из данных рис. 3–6 можно сделать выводы, что значительный эффект по приросту горчицы был достигнут за счет:

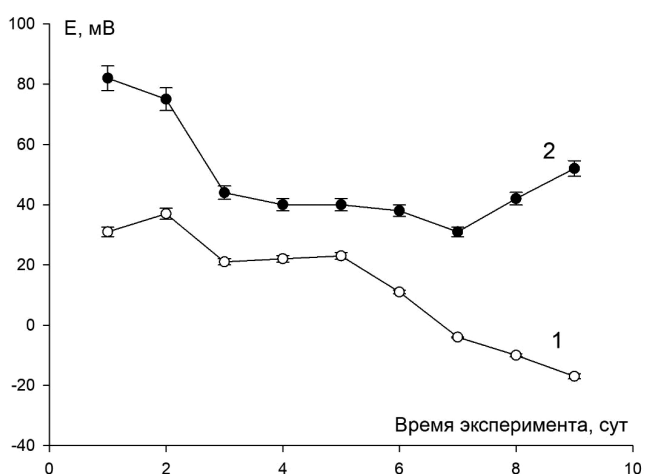


Рис. 4. Изменение окислительно-восстановительного потенциала E водного раствора аквапонной системы при разных способах выращивания горчицы: 1 — без электролитической обработки; 2 — с электролитической обработкой

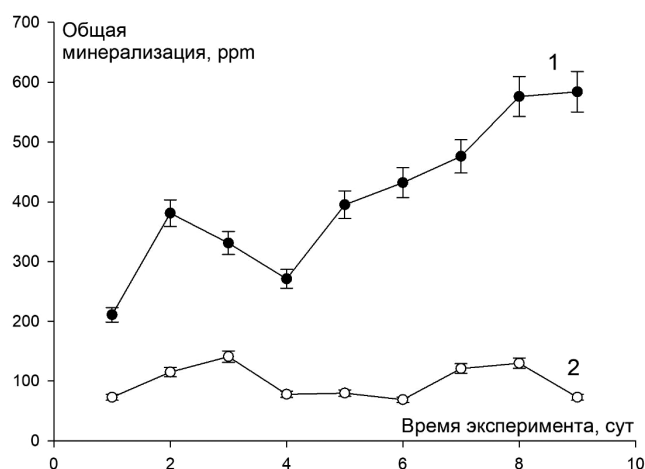


Рис. 5. Изменение общей минерализации водного раствора аквапонной системы при разных способах выращивания горчицы: 1 — без электролитической обработки; 2 — с электролитической обработкой

— стабилизации pH раствора (см. рис. 3). Известно, что оптимальным значением для выращивания растений является слабкокислая реакция среды, равная, приблизительно 6,5; при таких значениях увеличивается доступность различных питательных веществ и минеральных элементов, что ведет к более интенсивному росту растений;

— поддержания положительных значений ORP (см. рис. 4). Раствор с окислительными свойствами в совокупности со сла-

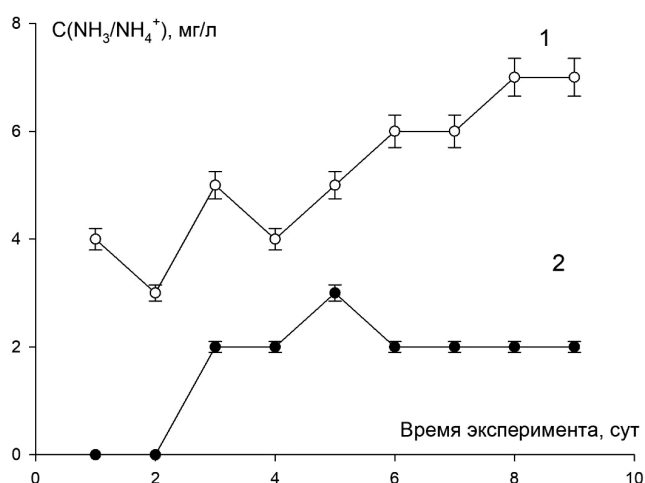


Рис. 6. Изменение концентрации аммиака/аммония ($\text{NH}_3/\text{NH}_4^+$) водного раствора аквапонной системы при разных способах выращивания горчицы: 1 — без электролитической обработки; 2 — с электролитической обработкой

бокислой реакцией среды способствует эффективному переводу азотистых соединений, а также органических продуктов метаболизма рыб в более доступную для растений форму. Доказательством данного факта является снижение общей минерализации раствора (см. рис. 5) при электролизной обработке; это говорит об эффективности извлечения растениями минеральных солей в доступной форме из раствора, что также подтверждается снижением концентрации аммиака/аммония в растворе (см. рис. 6).

Оценка же органолептического показателя водного раствора «Светопроницаемость» в водной среде после электролиза демонстрирует его стабилизацию на уровне значений 77–78%. При этом в контроле имеет место его постоянное падение до 33,2% и превращения водного раствора в мутный субстрат (рис. 7).

Соответственно, на основании обоснованной технологической эффективности использования безреагентной электролизной обработки водного раствора можно предложить следующую схему аквапонной системы (рис. 8).

Такая схема включает следующие элементы: гидравлическое обеспечение (емкости,

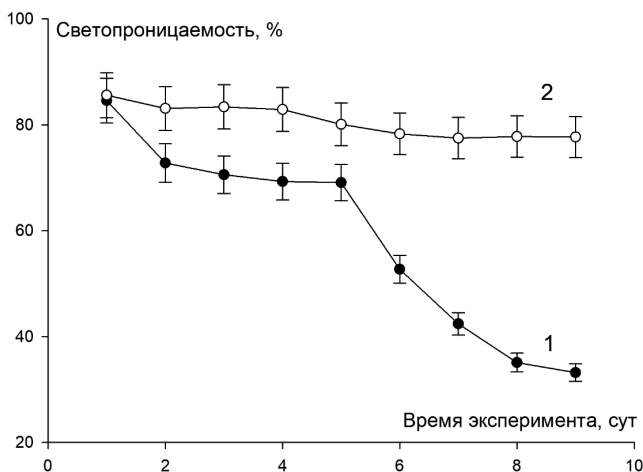


Рис. 7. Изменение светопрозрачности водного раствора аквапонной системы при разных способах выращивания горчицы: 1 — без электролитической обработки; 2 — с электролитической обработкой

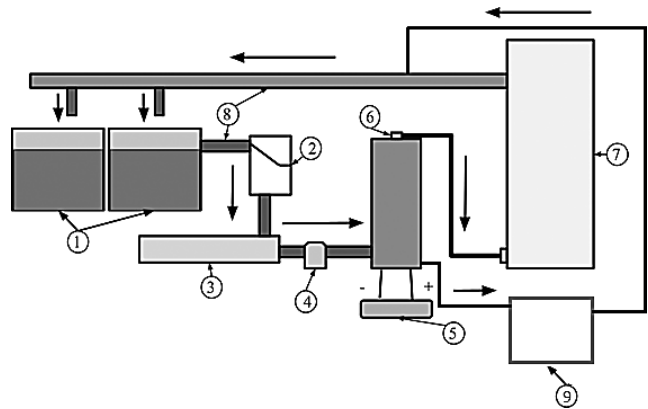


Рис. 8. Схема аквапонной системы с безреагентной электролизной интенсификацией выращивания микрозелени: 1 — рыбоводные емкости; 2 — система механической фильтрации; 3 — отстойник; 4 — насос; 5 — источник питания постоянного тока; 6 — электролизер; 7 — флотатор; 8 — лотки водоподвода; 9 — гидропонный модуль

насос, лотки водоподвода); модуль физической очистки водного раствора (механическая фильтрация, отстойник, флотатор); модуль электрохимической интенсификации выращивания микрозелени (источник питания постоянного тока, электролизер), с интегрированным блоком управления [14]; модуль гидропонной культивации растений.

При этом дополнительные затраты на электрохимические процессы будут составлять до 40% от энергозатрат на функционирование насосного оборудования, чтократно компенсируется приростом урожая фитопродукции.

Заключение

Установлено, что безреагентная электролизная обработка водного раствора в аквапонных системах является перспективным интенсифицирующим технологическим способом. Разработана безреагентная технология интенсификации процесса выращивания микрозелени в гидропонных системах, которая позволяет повысить их производительность без дополнительного загрязнения водных растворов, что подтверждено экспериментальными исследованиями, в результате которых был зафиксирован

прирост горчицы на 34,16%. Предлагается использовать электрохимические блоки для модернизации производственных установок получения гидробионтов и фитопродукции, располагая их перед гидропонным модулем.

Дальнейшие исследования целесообразно нацелить на построение систем управления процессами в аквапонных установках и созданию специализированных энергоэффективных источников питания постоянного тока.

Работа выполнена в рамках поддержки РФФИ по исследовательскому проекту № 18-29-24113; в рамках Программы развития флагманского университета на базе Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова с использованием оборудования Центра высоких технологий при БГТУ им. В.Г. Шухова.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гудкова Т.В. Глобальные цепочки создания добавленной стоимости в условиях цифровизации экономики // Журнал экономической теории. 2020. Т. 17. № 1. С. 53–64.
2. Цели устойчивого развития [Электронный ресурс] // Global Compact Network Russia. URL: <http://www.globalcompact.ru/index/czeli%ustojchivogo%razvitiya.html> (дата обращения: 25.07.2022).
3. Данилова А.А. и др. Аквапоника как перспективное направление сельского хозяйства // Современное состояние, проблемы и перспективы развития аграрной науки. 2019. С. 36–37.
4. Козырь А.В., Цвирко Л.С. Влияние аквапонного модуля на содержание азотистых соединений в тепловодных установках замкнутого водоснабжения при выращивании клариевого сома (*Clarias Gariepinus*) // Вестник Полесского государственного университета. Серия природоведческих наук. 2019. № 1. С. 87–94.
5. Локшин Э.П., Тареева О.А. Переработка анкилитсодержащего сырья методом сорбционной конверсии // Химическая технология. 2022. Т. 23. № 7. С. 317–324. DOI: 10.31044/1684-5811-2022-23-7-317-324
6. Муллакаев М.С., Муллакаев Р.М. Модернизация технологии очистки стоков кондитерского производства с ультразвуковой активацией реагентов // Химическая технология. 2021. Т. 22. № 10. С. 472–479. DOI: 10.31044/1684-5811-2021-22-10-472-479
7. Пасечник А.А., Петров С.К., Патрушева Т.Н., Енютина Т.А. Термическое обезвреживание отходов как метод снижения негативного воздействия на окружающую среду // Химическая технология. 2019. Т. 20. № 6. С. 281–287. DOI: 10.31044/1684-5811-2019-20-6-281-287
8. Абоносимов О.А., Лазарев С.И., Шестаков К.В., Левин А.А. Структурные и проницаемые характеристики ацетатцеллюлозных мембран при очистке промышленных стоков гальванических производств // Химическая технология. 2018. Т. 19. № 2. С. 74–80.
9. Al-Ghamdi A.A. M. The effect of magnetic water on soil characteristics and Raphanus sativus L. growth // World Journal of Environmental Biosciences. 2020. V. 9. N 1. P. 16–20.
10. Штепа В.Н. и др. Интенсификация процессов биотехнологических систем при ультразвуковом воздействии // Энергетика и автоматика. 2020. № 3. С. 45–57.
11. Starodubtseva G.P. et al. Process control of pre-sowing seed treatment by pulsed electric field // Acta Technologica Agriculturae. 2018. T. 21. N 1. C. 28–32.
12. Штепа В.Н., Заец Н.А., Алексеевский Д.Г. Использование электролизных процессов в безреагентной водоочистке: удаление сероводорода, органического железа, синтетических поверхностно-активных веществ // Энергетика и автоматика. 2021. № 2. С. 52–68.
13. Черныш Е.Ю. и др. Анаэробное сбраживание птичьего помета с инокулятом активного ила в комбинации с электролизной обработкой // Проблемы региональной энергетики. 2022. № 2 (54). С. 101–113.
14. Штепа В.Н., Заец Н.А., Алексеевский Д.Г. Адаптивные решения интеллектуального управления очистными сооружениями. Новые методы и технологии в водоснабжении и водоотведении: сборник трудов. Институт жилищно-коммунального хозяйства Беларуси / Под общ. ред. В.О. Китикова. Минск: БГТУ, 2022. С. 281–287.

ООО «Наука и технологии»

Учредитель журнала ООО «Наука и технологии».

Журнал зарегистрирован в Комитете Российской Федерации по печати.
Свидетельство о регистрации № 018874 от 27.05.1999 г.

Оригинал-макет и электронная версия изготовлены в ООО «Сид».

Сдано в набор 14.02.2023. Подписано в печать 04.04.2023.
Формат 60 × 88 1/8. Печать цифровая. Усл. печ. л. 4,88. Уч.-изд. л. ?,?. Тираж 55 экз. «Свободная цена».

Отпечатано в ООО «Сид».