

СОВРЕМЕННЫЕ ПОДХОДЫ К БИОЛОГИЧЕСКОЙ ОЧИСТКЕ ВОДЫ В УСТАНОВКАХ ЗАМКНУТОГО ВОДОСНАБЖЕНИЯ: ПРОБЛЕМЫ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ

А.Б. Шикунец*, В.Н. Штепа**, Д.Д. Жерносеков***

*Учреждение образования «Полесский государственный университет»

**Учреждение образования «Белорусский государственный технологический университет»

***Учреждение образования «Витебский государственный университет имени П.М. Машерова»

Авторами рассмотрены современные подходы к биологической очистке воды в установках замкнутого водоснабжения (УЗВ) с акцентом на повышении эффективности биофильтрации за счет оптимизации микробного состава и улучшения условий его работы.

Цель статьи — анализ проблем существующих подходов к биологической очистке воды в рыбоводных установках замкнутого водоснабжения, а также поиск возможных их решений.

Материал и методы. Объектом исследования в данном случае служила микрофлора с элементов биоагрузки системы биологической фильтрации в УЗВ. Одновременно исследовали микроорганизмы другой модельной системы для определения влияния электролизной обработки воды на общее микробное число (ОМЧ). Для этого использовали методику посева жидкого образца на плотные микробиологические питательные среды с дальнейшим подсчетом выросших колоний микроорганизмов. Для приготовления исследуемых растворов применялся безмембранный электротехнологический модуль с графитовыми электродами.

Результаты и их обсуждение. В ходе исследования определены ключевые действующие группы микроорганизмов в системе биологической фильтрации в рыбоводной установке. Показано стимулирующее влияние электролитически обработанных водных растворов на микроорганизмы модельной системы.

Заключение. На основании полученных результатов предложен комплексный подход, включающий выделение и идентификацию микроорганизмов из биофильтра УЗВ, разработку отечественных микробных препаратов и внедрение электротехнологических модулей для стабилизации физико-химических параметров воды. Внедрение такого подхода позволит повысить эффективность работы системы биологической очистки в УЗВ, а также снизить количество потребляемой воды для работы рыбоводных установок и улучшить состояние выращиваемых гидробионтов.

Ключевые слова: установка замкнутого водоснабжения, биофильтрация, нитрифицирующие микроорганизмы, микробные препараты, электротехнологический модуль, индустриальная аквакультура.

CONTEMPORARY APPROACHES TO BIOLOGICAL WATER TREATMENT IN CLOSED WATER SUPPLY FACILITIES PROBLEMS AND PROSPECTS OF DEVELOPMENT

A.B. Shikunets*, V.N. Shtepa**, D.D. Zhernosekov***

*Education Establishment "Polesski State University"

**Education Establishment "Belarusian State Technological University"

***Education Establishment "Vitebsk State P.M. Masherov University"

The authors considered contemporary approaches to biological water treatment in closed water supply facilities (CWSF) concentrating on the increase of the efficiency of bio filtration due to microbe composition optimization and improvement of the conditions of its operation.

The purpose of the paper is an analysis of the problems of the existing approaches to biological water treatment in fishing closed water supply facilities as well as search for their possible solutions.

Material and methods. The research object in this case was micro flora from bio load elements of the system of biological filtration in CWSF. Microorganisms of another model system for the identification of the impact of electrolysis water treatment on the general microbe number (GMN) were simultaneously studied. The method of seeding of a liquid sample in dense microbiological substratum with further calculation of the grown colonies of microorganisms was used for it. To prepare the studied solutions a membraneless electro technological module with graphite electrodes was used.

Findings and their discussion. In the course of the research key operating groups of microorganisms in the system of biological filtration in the fish facilities were identified. The stimulating impact of electrolytically treated water solutions on the microorganisms of the model system was shown.

Conclusion. Based on the obtained results an approach is suggested which includes the extraction and identification of microorganisms from the CWSF bio filter, development of domestic microbe preparations and introduction of electro technological modules for the stabilization of water physical and chemical parameters. The introduction of this approach will make it possible to increase the efficiency of the work of the system of biological treatment in CWSF as well as reduce the consumption of water for the operation of fishing facilities and improve the grown hydrobionts.

Key words: closed water supply facilities, bio filtration, nitrifying microorganisms, microbe preparations, electro technological module, industrial aquaculture.

В Беларуси уровень собственного производства рыбы и рыбной продукции для обеспечения потребностей населения за последние 7 лет в среднем составляет не выше 15%. Остальную часть потребляемой в республике рыбы (около 85%) составляет импорт, тем самым создается угроза продовольственной безопасности страны. По рекомендациям Министерства здравоохранения РБ, годовое потребление рыбы должно составлять 21,3 кг/чел, при фактических значениях 14–15 кг/чел в год [1]. Для более полного обеспечения населения Республики Беларусь рыбой и рыбопродуктами была разработана Министерством сельского хозяйства и продовольствия и утверждена Советом Министров Республики Беларусь Государственная программа «Аграрный бизнес» на 2021–2025 годы, включающая ряд подпрограмм, в том числе подпрограмму 5 «Развитие рыбохозяйственной деятельности». В документе предусмотрен рост объемов производства рыб в Беларуси к 2025 г. до 17,68 тыс. т, в том числе 16,55 тыс. т за счет аквакультуры и 1,13 тыс. т за счет вылова в рыболовных угодьях. В основном в стране превалирует прудовое рыбоводство, оно дает около 96% от общего количества выращиваемой рыбы, однако этот способ имеет ряд недостатков:

- высокие капитальные затраты при создании новых предприятий;
- зависимость от климатических факторов и наличия водных ресурсов;
- продолжительный производственный цикл и низкие плотности посадки.

Использование же индустриальной технологии выращивания гидробионтов позволяет гарантированно, круглогодично, без влияния природных факторов, получать качественную рыбу при высоких плотностях посадки. Выращивание, к примеру, клариевого сома (*Clarias gariepinus*) возможно при плотностях посадки до 600 кг/м³, при производственном цикле от 50-граммового посадочного материала до товарной особи массой 900–1000 граммов за 6 месяцев [2]. Однако установка замкнутого водоснабжения является сложной агробиотехнологической системой, совмещающей технические агрегаты и биологические процессы. Технология выращивания подразумевает многократное повторное использование воды, поскольку в процессе выращивания и кормления последняя насыщается большим количеством метаболитов. Накопление данных веществ в воде приводит к снижению темпов набора массы или гибели рыбы. Систему биологической фильтрации называют «сердцем» УЗВ. Именно она позволяет производить преобразование азотистых соединений путем нитрификации, снижая токсичность метаболитов. Это возможно благодаря колониям микроорганизмов, которые адсорбируются на элементах биологической загрузки. Наиболее сложным технологическим процессом является первоначальный запуск и вывод на проектную мощность системы биологической фильтрации. На данный момент ощущается недостаток научно обоснованных методик старта, а также отечественных микробных препаратов, обеспечивающих интенсификацию процесса запуска и функционирования биофильтра в системе УЗВ.

Ранее были представлены результаты функционирования системы биологической фильтрации в установке замкнутого водоснабжения, специализированной для выращивания африканского клариевого сома (*Clarias gariepinus*). Так, в [3] были определены необходимые условия для стабильного функционирования сообщества нитрифицирующих бактерий:

- pH (6,5–8);
- температура (20–25°C);

- концентрация растворенного кислорода (3–4 мг/л);
- концентрация взвешенных частиц (<25 мг/л).

В дальнейших исследованиях этого же автора [4] было показано, что для стабильной работы биофильтра требуются следующие параметры: температура от 13 до 28°C, TAN (общий аммонийный азот) около 3–4 мг/л, pH 8,0–8,2. Проводя анализ данных литературы, исследователь подчеркивает, что бактерии родов *Nitrosomonas* и *Nitrobacter* могут эффективно функционировать при значениях данного показателя от 7,3 до 8,1. Кроме того, в числе необходимых условий указываются низкая освещенность, отсутствие прямых солнечных лучей, соблюдение проточности и низкие концентрации взвешенных веществ.

Однако в работе также отмечается, что при эксплуатации система биологической фильтрации сталкивается с рядом проблем: конкуренцией нитрифицирующих микроорганизмов с антагонистами за субстрат (биозагрузку), перепадами значений окислительно-восстановительного потенциала, недостаточной степенью механической очистки и т.д.

Кроме того, в отечественных работах не проводились исследования видовой структуры сообщества бактерий биофильтра, а также влияния отдельных видов микроорганизмов на стадии очистки оборотных вод установки замкнутого водоснабжения от загрязняющих компонентов.

Эта проблема частично освещена в научных публикациях зарубежных авторов. При этом наблюдаются расхождения в результатах. Так, в [5] приведены данные о том, что основными действующими микроорганизмами в процессе нитрификации являются бактерии рода *Nitrosomonas* и *Nitrobacter*. В то же время другие исследователи [6] указывают, что основной вклад в процесс нитрификации в биофильтре пресноводной установки замкнутого водоснабжения вносят археи рода *Nitrosospira*, одновременно бактерии рода *Nitrosomonas* присутствуют в растворе в незначительных количествах, а бактерии рода *Nitrobacter* отсутствуют. Эти результаты находят подтверждение в исследованиях микробного сообщества солоноводных установок замкнутого водоснабжения [7; 8; 9]. В этих работах доказывается главенствующее влияние архей рода *Nitrosospira*, а также отмечается их высокая метаболическая активность и способность осуществлять полный цикл нитрификации. Кроме того, в системе биологической фильтрации обнаружены бактерии родов *Nitrotoga* и *Nitrosococcus*.

Следует подчеркнуть, что данные об оптимальных показателях среды для жизни изучаемой группы микроорганизмов в приведенных выше зарубежных исследованиях значительно отличаются.

Поскольку в литературе нет единого мнения по изучаемому вопросу, нами было проведено исследование микробного сообщества модельной системы биологической фильтрации и предложен способ повышения количества нитрифицирующих бактерий. С целью же стабилизации гидрохимического режима в биофильтре была представлена технология внедрения электротехнологического модуля.

Материал и методы. Выращивание нитрифицирующих бактерий производили в лабораторной модельной установке, имитирующей работу системы биологической фильтрации в УЗВ (рис. 1).

Для имитации работы биофильтра УЗВ использовали две емкости, в одной из которых водный раствор перед подачей в емкость обрабатывали посредством проточного электротехнологического модуля, а в другой обработка отсутствовала и подавалась водопроводная вода. В каждой из емкостей была организована аэрация при помощи поршневых компрессоров (BOYU, Китай) производительностью 110 л/мин. Также в систему подавался раствор нашатырного спирта из резервуаров объемом 20 л, расположенных над биофильтром. Раствор вносили в эквиваленте 2,0 г аммиака в сутки, что соответствовало производительности биозагрузки HeI-X с полезной площадью 644 м²/м³. Для переработки заданного объема азотистых соединений в каждую емкость-реактор было помещено 15 л вышеуказанного субстрата. Расчет требуемого объема биофильтра производился исходя из количества выращиваемых в системе гидробионтов (рыб).

С целью формирования сообщества нитрифицирующих микроорганизмов производили их выращивание в биофильтре в течение одного месяца, после чего были отобраны пробы биозагрузки, а также осадка, образующегося на дне емкостей. Далее был проведен микробиологический анализ.

Для определения нитрифицирующих микроорганизмов в системе использовали микробиологические питательные среды следующего состава:

- среда Виноградского I для первого этапа нитрификации: $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ — 2,0 г; K_2HPO_4 — 1,0 г; $\text{MgSO}_4 \times 7\text{H}_2\text{O}$ — 0,5 г; NaCl 2,0 г; $\text{FeSO}_4 \times 7\text{H}_2\text{O}$ — 0,05 г; CaCO_3 — 5,0 г; вода водопроводная до 1000,0 мл;

– среда Виноградского II для второго этапа нитрификации: NaNO_2 — 1,0 г; K_2HPO_4 — 0,5 г; $\text{MgSO}_4 \times 7\text{H}_2\text{O}$ — 0,5 г; NaCl — 0,5 г; $\text{FeSO}_4 \times 7\text{H}_2\text{O}$ — 0,4 г; Na_2CO_3 — 1,0 г; вода водопроводная до 1000,0 мл.

В среду Виноградского для каждого этапа нитрификации объемом 500 мл вносили по 4 пластиковых элемента биоагрузки из 2 лабораторных реакторов, а также осадок по отдельности. Культивирование проводили на орбитальном шейкере-инкубаторе (VS 60 OI, Германия), обеспечивающем 180 об./мин при температуре 28°C в течение 21 дня. По истечении времени культивирования образцы были высеваны на аналогичные агаризованные среды.

Для подтверждения эффекта воздействия электролизной обработки воды на микрофлору была проведена серия опытов, в которых определяли ОМЧ (общего микробного числа) в образцах, обработанных жидкостями из различных зон электротехнологического модуля.

Выращивание нитрифицирующих бактерий требует длительного времени и специфического состава питательных сред, поэтому в качестве модельной системы микроорганизмов использовались смывы с образцов свиного мяса, являющегося благоприятной средой для роста микрофлоры. Данные бактерии дают хороший рост в течение 3 дней на плотных питательных средах, предназначенных для определения обсемененности, что делает их удобными моделями для исследования влияния электролизной обработки на ОМЧ. Для приготовления растворов, в которых происходило их замачивание, применяли стерильную воду, католит и анолит, а также их смесь, полученные в результате работы электротехнологического модуля, принципиальная схема которого представлена ниже (рис. 2).



Рис. 1. Лабораторная модель системы биологической фильтрации

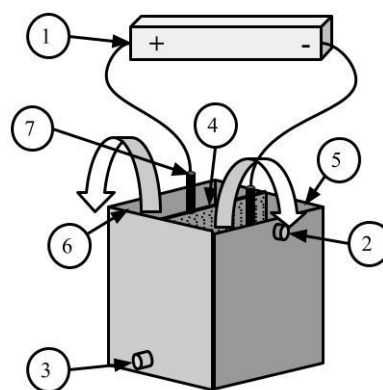


Рис. 2. Принципиальная схема электротехнологического модуля:
1 — источник питания, 2 — отверстие для отвода воды,
3 — кран для подвода воды, 4 — мембрана, 5 — катодная зона,
6 — анодная зона, 7 — электрод

Вышеуказанные жидкости используются для получения смывов с образцов мяса с целью имитации работы убойного цеха мясокомбината в соответствии с ГОСТом 54354 — 2011.

Для количественного определения микроорганизмов в этих смывах применяли методику посева жидкого образца на плотные питательные среды. Перед этим производили серию последовательных разведений полученных растворов стерильной дистиллированной водой, что необходимо для получения концентрации микроорганизмов, которую можно точно определить после инкубации в течение трех дней в термостате при температуре 37–38°C. Для этого использовали питательную среду КМА-ФАНМ, предназначенную для установления общего микробного числа.

Фиксировался ряд физико-химических показателей воды.

Измерение значений окислительно-восстановительного потенциала (ОВП) растворов производили при помощи портативного ОВП-метра (Thermo Scientific Elite ORP, США). Кислотность среды выявляли pH-метром той же фирмы. Показатель TDS (Total Dissolved Solids) фиксировали посредством TDS-метра/солемера марки (TDS-3, Китай), количество азотистых соединений измерялось при помощи фотометра (eXact Micro 20, США). Все измерения производились в трехкратной повторности.

Статистическая обработка результатов осуществляли посредством программного обеспечения Microsoft Excel.

Результаты и их обсуждение. В результате микробиологического исследования биозагрузки и осадка системы биологической фильтрации было показано, что в обеих емкостях присутствуют бактерии первой и второй фаз нитрификации, что в совокупности со стабильной конверсией аммиака и нитритов свидетельствует о наличии активного микробиологического нитрифицирующего процесса (табл. 1).

Таблица 1

Результаты микробиологического анализа системы биологической фильтрации

Среда Виноградского	Система 1 (без обработки в электротехнологическом модуле), КОЕ/мл	Система 2 (с обработкой в электротехнологическом модуле), КОЕ/мл	Осадок биофильтра, КОЕ/мл	Роды бактерий, определенные в результате анализа
Первый этап нитрификации	$1,76 \times 10^5$	$4,5 \times 10^6$	$1,84 \times 10^5$	Nitrosomonas и Nitrosococcus
Второй этап нитрификации	$2,7 \times 10^4$	$7,6 \times 10^4$	$5,12 \times 10^5$	Nitrobacter

Исходя из приведенных данных, можно сделать вывод, что электролизная обработка воды, подаваемой в систему биологической фильтрации, позволяет значительно увеличить количество нитрифицирующих микроорганизмов обеих фаз нитрификации, что, в свою очередь, в перспективе повысит эффективность очистки оборотных вод в УЗВ.

Далее проводили исследование влияния жидкостей, полученных в результате работы электротехнологического модуля, на общее микробное число.

Перед получением смывов были измерены физико-химические показатели исходных растворов. Результаты отражены в табл. 2.

Таблица 2

Показатели растворов перед замачиванием образцов мяса

Раствор/Показатели	NH_4^+ , мг/л	NO_2^- , мг/л	NO_3^- , мг/л	ОВП, мВ	TDS, ppm	pH	T, °C
Контроль (стерильная водопроводная вода)	0,0	0,0	$9,0 \pm 0,5$	$-25,5 \pm 0,4$	$270,0 \pm 1,5$	$7,2 \pm 0,2$	23,1
Анолит	0,0	0,0	$8,0 \pm 0,5$	$41,5 \pm 0,3$	$321,0 \pm 1,7$	$6,1 \pm 0,1$	22,7
Католит	0,0	0,0	$9,0 \pm 0,4$	$-68,2 \pm 0,4$	$279,0 \pm 1,4$	$8,2 \pm 0,1$	22,9
Анолит+католит	0,0	0,0	$8,0 \pm 0,5$	$-8,3 \pm 0,2$	$291,0 \pm 1,5$	$7,1 \pm 0,2$	22,5

После замачивания образцов мяса смывы оставляли на сутки. Повторно были измерены те же показатели, которые определялись перед обработкой. Результаты представлены в табл. 3.

Таблица 3

Показатели спустя сутки после замачивания образцов мяса

Раствор/Показатели	NH_4^+ , мг/л	NO_2^- , мг/л	NO_3^- , мг/л	ОВП, мВ	TDS, ppm	pH	T, °C
Контроль (водопроводная вода)	$1,4 \pm 0,08$	$0,2 \pm 0,01$	$12,5 \pm 0,4$	$-12,9 \pm 0,2$	$262,0 \pm 0,7$	$7,4 \pm 0,1$	19,7
Анолит	$0,4 \pm 0,05$	$0,1 \pm 0,01$	$10,0 \pm 0,5$	$3,8 \pm 0,4$	$327,0 \pm 0,4$	$6,9 \pm 0,2$	19,7
Католит	$0,8 \pm 0,02$	$0,1 \pm 0,01$	$8,0 \pm 0,3$	$-19,9 \pm 0,4$	$284,0 \pm 0,5$	$7,7 \pm 0,1$	19,6
Анолит+католит	$0,4 \pm 0,04$	0,0	$12,5 \pm 0,5$	$-8,1 \pm 0,3$	$285,0 \pm 0,5$	$7,3 \pm 0,1$	19,7

Как видно из приведенных данных, спустя сутки после замачивания мяса во всех смывах наблюдается повышение концентрации аммонийного азота, нитритов и нитрат-иона. При этом показатели кислотности и окислительно-восстановительного потенциала стремятся к нейтральным значениям. Однако следует отметить, что смыв на основе смеси католита и анолита показал самые низкие концентрации аммиака и нитритов. Эти соединения наиболее токсичны для объектов аквакультуры. О конверсии данных соединений свидетельствует наличие нитрат-иона, являющегося показателем конечной стадии разложения аммиака.

После проведения измерений из всех четырех смывов были отобраны образцы с целью определения количества микроорганизмов. Результаты после посева каждого из этих образцов на питательную среду КМАФАнМ приведены в табл. 4.

Таблица 4

Обсемененность образцов растворов, обработанных посредством электролиза

Образец	Обсемененность, КОЕ/мл
Контроль (водопроводная вода)	$1,2 \cdot 10^9$
Анолит	$2,1 \cdot 10^4$
Католит	Сплошной рост по поверхности питательной среды
Смешанный раствор анолита и католита (1:1)	$3,1 \cdot 10^9$

Анализируя полученные данные, можно сделать вывод, что католит и его смесь с анолитом способствуют увеличению количества микроорганизмов в растворе. Так, показано, что смешанный раствор повышает количество микроорганизмов на поверхности питательной среды спустя 72 часа после посева в 2,6 раза. В то же время анолит значительно снизил общее микробное число. Это можно объяснить тем, что в условиях слабокислой среды и высоких значений ОВП (окислительно-восстановительного потенциала) в клетках живых организмов происходит оксидативный стресс, приводящий зачастую к гибели бактерий. В то же время противоположный эффект наблюдался при воздействии католита. В этом случае определить количество микроорганизмов не представляется возможным из-за сплошного зарастания среды (рис. 3).

Исходя из полученных данных, в рамках будущего исследования планируется провести детальный анализ видового состава нитрифицирующих микроорганизмов в биофильтрах УЗВ, с применением как классических бактериальных посевов и различных методик окрашивания, так и современных методов метагеномного секвенирования [10]. На следующем этапе предполагается получить накопительные культуры идентифицированных микроорганизмов и экспериментально определить оптимальные параметры их жизнедеятельности (рН, температура, концентрация кислорода, уровень взвешенных частиц), с учетом специфики УЗВ нашей страны. Для этого планируется подготовить ряд модельных растворов азотистых соединений, в которые будет помещена биозагрузка с адсорбированными на ней микроорганизмами из накопительных культур. Следовательно, будет возможно более точно определить влияние показателей окружающей среды на выживаемость и активность сообщества нитрифицирующих бактерий. Впоследствии можно выделить культуры таких микроорганизмов, которые будут проявлять устойчивость к стрессовым воздействиям внешней среды. Полученные данные в перспективе могут стать основой для разработки отечественного микробного препарата, содержащего сбалансированный консорциум бактерий, адаптированных к условиям жизнедеятельности в УЗВ. Подобный препарат позволит облегчить и ускорить процесс запуска биофильтра и, при периодическом внесении, повысить устойчивость системы к факторам внешней среды.

Дополнительным решением во время работы биофильтра может стать внедрение описанного выше электротехнологического модуля. Как было показано нами в ходе исследования, данное устройство способно регулировать некоторые параметры воды (например, стабилизировать рН и количество соединений азота), создавая оптимальные условия для нитрифицирующего сообщества, а также при определенных режимах обработки повышает ОМЧ.

Кроме того, электролитическая обработка положительно влияет на жизнедеятельность микроорганизмов, что подтверждается и в [11]. Было показано, что периодическая обработка анаэробного активного ила и продукты электролизных реакций положительно влияли на уровень метаногенеза. В этом случае наблюдалось повышение выхода биогаза и рост общего количества микроорганизмов. К тому же растворы, обработанные при помощи электротехнологического модуля, могут оказывать стимулирующее влияние не только на бактерии, но и на прочие виды живых организмов, что свидетельствует об их явном биологическом эффекте [12]. Например, такие растворы используются для профилактики и лечения диспепсии, абомазоэнтеритов и бронхопневмоний у телят, гастроэнтеритов, токсической гепатодистрофии у поросят, гастроэнтеритов и мочекаменной болезни у собак и кошек.

В условиях работы установки замкнутого водоснабжения возможна реализация лишь проточного варианта электротехнологического модуля, который будет встроен в контур циркулирующей жидкости (рис. 4).



Рис. 3. Влияние католита на общее микробное число при посеве на питательную среду КМАФАнМ

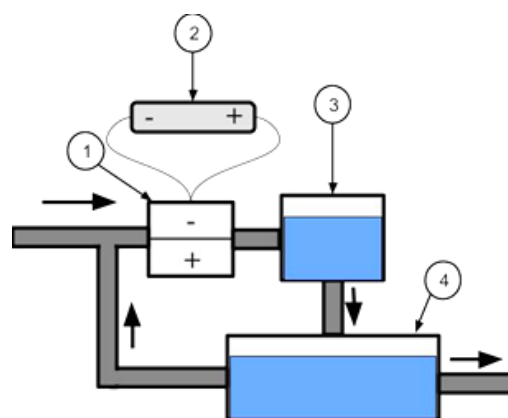


Рис. 4. Принципиальная схема внедрения электротехнологического модуля в УЗВ: 1 — электротехнологический модуль, 2 — источник тока, 3 — биофильтр, 4 — рыбоводная емкость

При этом данная конфигурация является наиболее благоприятной, т.к. происходит равномерное смешение растворов из анодной и катодной зон, что, исходя из вышеописанных результатов, контролируемо повышает количество нитрифицирующих микроорганизмов в биофильтре при условии соблюдения необходимых для их жизнедеятельности показателей среды.

Так, комбинация микробного препарата и применения электротехнологического модуля в перспективе может снизить зависимость биофильтра от внешних факторов и повысить эффективность очистки оборотных вод УЗВ, что критически важно для увеличения плотности посадки и сокращения производственного цикла в условиях индустриальной аквакультуры.

Заключение. Проведенный анализ актуализирует разработки научно обоснованных подходов к биологической очистке воды в установках замкнутого водоснабжения. Изучение литературных данных выявило ключевые проблемы, связанные с недостаточным исследованием микробных сообществ биофильтров, их видовой структуры, а также адаптации к условиям УЗВ. Установлено, что без внесения дополнительных бактериальных культур в биофильтр процесс нитрификации осуществляют бактерии родов *Nitrosomonas* и *Nitrobacter*. Предложенный комплексный подход, включающий идентификацию и выделение отдельных родов нитрифицирующих микроорганизмов, экспериментальное определение оптимальных параметров среды и разработку отечественных микробных препаратов, направлен на повышение эффективности биофильтрации. Важным дополнением является внедрение в контур установки замкнутого водоснабжения электротехнологических модулей, способных стабилизировать критические показатели воды (рН, уровень кислорода), что усилит устойчивость системы к внешним факторам. Реализация данных решений позволит ускорить запуск биофильтров и, соответственно, повысить количество выращиваемой рыбы, а также сократить производственный цикл, что соответствует целям Государственной программы

«Аграрный бизнес». Дальнейшие исследования целесообразно направить на изучение видового состава микробных консорциумов в УЗВ, оптимизацию режимов работы электротехнологических модулей и реализацию разработанных методик в промышленных условиях.

Работа выполнена в рамках отдельного проекта научно-исследовательских работ, финансируемого Министерством образования Республики Беларусь.

ЛИТЕРАТУРА

1. Агеец, В.Ю. Потребление рыбы в Беларуси и перспективы ее производства / В.Ю. Агеец, Г.И. Корнеева // Вопросы рыбного хозяйства Беларуси. — 2017. — № 1(33). — С. 23–31.
2. Ярмош, В.В. Методика морфометрических исследований рыбохозяйственных показателей клариевого сома (*Clarias gariepinus*) / В.В. Ярмош, А.В. Козырь // Вестник Палескага дзяржаўнага ўніверсітэта. Серыя прыродазнаўчых навук. — 2022. — № 2. — С. 74–81.
3. Козырь, А.В. Рыбоводно-технологическая оценка установок замкнутого водоснабжения и пути повышения их ресурсоэффективности / А.В. Козырь // Вестник Палескага дзяржаўнага ўніверсітэта. Серыя прыродазнаўчых навук. — 2022. — № 1. — С. 55–65.
4. Козырь, А.В. Определение факторов, влияющих на систему биологической фильтрации в индустриальной аквакультуре, и методы повышения ее эффективности / А.В. Козырь // Вопросы рыбного хозяйства Беларуси. — 2022. — Вып. 38. — С. 167–182.
5. Evaluation of nitrifying bacteria product to improve nitrification efficacy in recirculating aquaculture systems / D.D. Kuhn, D.D. Drahos, L. Marsh, G.J. Flick // Aquacultural Engineering. — 2010. — Vol. 43, № 2. — P. 78–82. — DOI: 10.1016/j.aquaeng.2010.07.001.
6. Bartelme, R.P. Freshwater Recirculating Aquaculture System Operations Drive Biofilter Bacterial Community Shifts around a Stable Nitrifying Consortium of Ammonia-Oxidizing Archaea and Comammox Nitrospira / R.P. Bartelme, S.L. McLellan, R.J. Newton // Frontiers in Microbiology. — 2017. — Vol. 8. — P. 101. — DOI: 10.3389/fmicb.2017.00101.
7. Relevance and Diversity of Nitrospira Populations in Biofilters of Brackish RAS / M. Kruse, S. Keuter, E. Bakker [et al.] // PLOS One. — 2013. — Vol. 8, № 5. — e64737. — DOI: 10.1371/journal.pone.0064737.
8. Taxonomic and functional profiling of nitrifying biofilms in freshwater, brackish and marine RAS biofilters / J. Hüpeden, B. Wemheuer, D. Indenbirken [et al.] // Aquacultural Engineering. — 2020. — Vol. 90. — 102094. — DOI: 10.1016/j.aquaeng.2020.102094.
9. Complete nitrification by Nitrospira bacteria / H. Daims, E. Lebedeva, P. Pjevac [et al.] // Nature. — 2015. — Vol. 528. — P. 504–509. — DOI: 10.1038/nature16461.
10. Идентификация нитрифицирующих бактерий / Н.И. Кириллова [и др.] // Ветеринарный врач. — 2021. — № 6. — С. 1–6.
11. Анаэробное сбраживание птичьего помета с инокулятом активного ила в комбинации с электролизной обработкой / Е.Ю. Черныш [и др.] // Проблемы региональной энергетики. — 2022. — № 2(54). — С. 101–113.
12. Электрохимически активированные растворы в животноводстве / А.А. Белко [и др.] // Ученые записки учреждения образования «Витебская ордена «Знак Почета» государственная академия ветеринарной медицины». — Витебск, 2015. — Т. 51, вып. 2. — С. 16–19.

REFERENCES

1. Ageyets V.Yu., Korneyeva G.I. *Voprosy rybnogo khoziaistva Belarusi* [Issues of Fishing Industry in Belarus], 2017, 1(33), pp. 23–31.
2. Yarmosh V.V., Kozyr A.V. *Vesnik Paleskaga dziazhaunaga universiteta. Pryrodaznauchiya navuki* [Journal of Paleski State University. Nature Sciences], 2022, 2, pp. 74–81.
3. Kozyr A.V. *Vesnik Paleskaga dziazhaunaga universiteta. Pryrodaznauchiya navuki* [Journal of Paleski State University. Nature Sciences], 2022, 1, pp. 55–65.
4. Kozyr A.V. *Voprosy rybnogo khoziaistva Belarusi* [Issues of Fishing Industry in Belarus], 2022, 38, pp. 167–182.
5. Evaluation of nitrifying bacteria product to improve nitrification efficacy in recirculating aquaculture systems / D.D. Kuhn, D.D. Drahos, L. Marsh, G.J. Flick // Aquacultural Engineering. — 2010. — Vol. 43, № 2. — P. 78–82. — DOI: 10.1016/j.aquaeng.2010.07.001.
6. Bartelme, R.P. Freshwater Recirculating Aquaculture System Operations Drive Biofilter Bacterial Community Shifts around a Stable Nitrifying Consortium of Ammonia-Oxidizing Archaea and Comammox Nitrospira / R.P. Bartelme, S.L. McLellan, R.J. Newton // Frontiers in Microbiology. — 2017. — Vol. 8. — P. 101. — DOI: 10.3389/fmicb.2017.00101.
7. Relevance and Diversity of Nitrospira Populations in Biofilters of Brackish RAS / M. Kruse, S. Keuter, E. Bakker [et al.] // PLOS One. — 2013. — Vol. 8, № 5. — e64737. — DOI: 10.1371/journal.pone.0064737.
8. Taxonomic and functional profiling of nitrifying biofilms in freshwater, brackish and marine RAS biofilters / J. Hüpeden, B. Wemheuer, D. Indenbirken [et al.] // Aquacultural Engineering. — 2020. — Vol. 90. — 102094. — DOI: 10.1016/j.aquaeng.2020.102094.
9. Complete nitrification by Nitrospira bacteria / H. Daims, E. Lebedeva, P. Pjevac [et al.] // Nature. — 2015. — Vol. 528. — P. 504–509. — DOI: 10.1038/nature16461.
10. Kirillova N.I. *Veterinarny vrach* [Veterinary Surgeon], 2021, 6, pp. 1–6.
11. Chernysh E.Yu. *Problemy regionalnoi energetiki* [Issues of Regional Energy industry], 2022, 2(54), pp. 101–113.
12. Belko A.A. *Ucheniye zapiski uchrezhdeniya obrazovaniya "Vitebskaya ordena Znak Pocheta gosudarstvennaya akademiya veterinarnoi meditsiny"* [Scientific Notes of Vitebsk State Order of Sign of Honor State Academy of Veterinary Medicine], Vitebsk, 2015, 51(2), pp. 16–19.

Поступила в редакцию 10.10.2025

Адрес для корреспонденции: e-mail: lesa.shikunets@gmail.com — Шикунец А.Б.