

**ВЛИЯНИЕ ЭЛЕКТРОЛИЗНОЙ ОБРАБОТКИ НА ДИНАМИКУ ЗАПУСКА  
БИОФИЛЬТРА В УСТАНОВКЕ ЗАМКНУТОГО ВОДОСНАБЖЕНИЯ**

**Шикунец Алексей Борисович, аспирант<sup>1</sup>**

**Козырь Алексей Викторович, старший преподаватель<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>Полесский государственный университет

**Штепа Владимир Николаевич, д.т.н., доцент**

**Белорусский государственный технологический университет**

**Жерносеков Дмитрий Данилович, д.б.н., доцент**

**Витебский государственный университет имени П.М. Машерова**

**EFFECT OF ELECTROLYSIS WATER TREATMENT ON BIOFILTER  
START-UP DYNAMICS IN RECIRCULATING AQUACULTURE SYSTEMS**

**Shikunets Aleksey, postgraduate student, [lesha.shikunets@gmail.com](mailto:lesha.shikunets@gmail.com)<sup>1</sup>**

**Kozyr Alexey, Senior Lecturer, [tpark.kozyr@gmail.com](mailto:tpark.kozyr@gmail.com)<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>Polesky State University

**Shtepa Vladimir, Doctor of Technical Sc., Associate Professor**

**Belarusian State Technological University, [tpoles@gmail.com](mailto:tpoles@gmail.com)**

**Zhernosekov Dmitry, Doctor of Biological Sc., Associate Professor**

**Vitebsk State University named after P.M. Masherov, [Chemikdd@mail.ru](mailto:Chemikdd@mail.ru)**

**Аннотация.** В работе представлены результаты сравнительного эксперимента по запуску лабораторной модели биофильтра установки замкнутого водоснабжения (УЗВ) с применением электролизной обработки. Установлено, что электрохимическое воздействие обеспечивает более стабильный щелочной pH, снижает нитритный пик на 40% и сокращает время вывода биофильтра на рабочий режим на 5 суток (~28%).

**Ключевые слова:** установка замкнутого водоснабжения, биофильтр, нитрификация, электролизная обработка, нитриты, pH, окислительно-восстановительный потенциал, нитрифицирующие бактерии.

**Abstract.** The paper presents the results of a comparative experiment on the start-up of a laboratory biofilter model for recirculating aquaculture system (RAS) with and without electrolysis water treatment. It was established that electrolysis treatment provides a more stable alkaline pH, reduces the nitrite peak by 40%, and shortens the biofilter maturation period by 5 days (~28%).

**Keywords:** recirculating aquaculture system, biofilter, nitrification, electrolysis treatment, nitrite, pH, oxidation-reduction potential, nitrifying bacteria.

**Введение.** Система биологической фильтрации является ключевым элементом установки замкнутого водоснабжения (УЗВ), обеспечивая конверсию токсичного аммония ( $\text{NH}_4^+$ ) в нитраты ( $\text{NO}_3^-$ ) посредством двухступенчатой нитрификации:  $\text{NH}_4^+ \rightarrow \text{NO}_2^-$  (аммоний-окисляющие бактерии, АОВ)  $\rightarrow \text{NO}_3^-$  (нитрит-окисляющие бактерии, NOB). Начальный период запуска биофильтра характеризуется формированием нитрифицирующего сообщества на элементах биоагрузки и сопровождается неизбежным транзитным накоплением нитритов – соединений, токсичных для гидробионтов [1].

Оптимальные условия для нитрификаторов (pH 7,5–8,5; температура 20–28°C; концентрация растворённого кислорода  $\geq 3$  мг/л) зачастую нарушаются в начальный период работы системы вследствие накопления кислот – продуктов нитрификации. Это приводит к ингибированию NOB, задержке второй фазы нитрификации и затяжному нитритному пику. Поиск методов повышения эффективности работы микробиологического сообщества нитрификаторов, а также стабилизации химических параметров воды на стадии запуска является актуальной задачей индустриальной аквакультуры [2].

Электролизная обработка воды в проточном режиме рассматривается как перспективный инструмент управления гидрохимическими параметрами в УЗВ [3]. Она базируется на том, что катодная реакция ( $2\text{H}_2\text{O} + 2\text{e}^- \rightarrow \text{H}_2\uparrow + 2\text{OH}^-$ ) генерирует гидроксид-ионы, повышая pH и буферную

ёмкость раствора, тогда как присутствие активных форм кислорода и изменение окислительно-восстановительного потенциала (ОВП) способны влиять на жизнедеятельность микробного сообщества. Также ранее в некоторых работах было показано стимулирующее воздействие католита на другие живые организмы, в том числе, на бактерии [4, 5].

Исходя из этого, целью исследования является экспериментальная оценка влияния работы электротехнологического модуля на динамику запуска лабораторной модели биофильтра УЗВ по ключевым гидрохимическим показателям.

**Материалы и методы.** Исследование проводилось в двух экспериментальных модулях, имитирующих систему биологической фильтрации. В качестве носителя микробного сообщества использовалась биоагрузка Hel-X (удельная площадь поверхности 644 м<sup>2</sup>/м<sup>3</sup>), объёмом 15 л при объеме системы 60 л. В качестве питательного вещества для нитрификаторов применялся раствор нашатырного спирта из расчёта 2,0 г аммиака в сутки, что соответствует возможностям используемой биоагрузки по конверсии аммиака/аммония. В эксперименте №1 воду перед подачей в биофильтр обрабатывали проточным безмембранным электротехнологическим модулем с графитовыми электродами. В эксперименте №2 такая обработка не производилась. Для обеих систем срок эксперимента составил 19 дней.

Ежедневно фиксировались: рН (рН-метр Thermo Scientific Elite), ОВП (ORP-метр Thermo Scientific Elite ORP), концентрации NO<sub>3</sub><sup>-</sup>, NO<sub>2</sub><sup>-</sup>, NH<sub>4</sub><sup>+</sup> (фотометр eXact Micro 20), TDS (TDS-3) и температура воды. Все измерения проводились в трёхкратной повторности. Статистическая обработка осуществлялась при помощи программного обеспечения Microsoft Excel и Statistica.

**Результаты и их обсуждение.** Динамика рН в эксперименте №1 (с электролизом) характеризовалась высокой стабильностью: значения удерживались в диапазоне 8,40–8,86 (σ=0,131), что соответствует оптимуму для нитрификаторов. В эксперименте 2 (без электролиза) рН снизился до 7,27 на 4-е сутки (кислотный стресс) и демонстрировал значительные флуктуации (диапазон 7,27–8,80; σ=0,373) – в 2,8 раза выше, чем при электролизе (таблица).

Таблица – Статистика ключевых параметров запуска биофильтра

Показатель	С электролизом	Без электролиза
рН, среднее ± σ	8,65 ± 0,13	7,84 ± 0,37
рН, диапазон	8,40–8,86	7,27–8,80
ОВП, среднее (мВ)	-81,4	-39,7
NO <sub>2</sub> max (мг/л)	6,0	10,0
День NO <sub>2</sub> <0,5 мг/л	13	18
NO <sub>3</sub> финальное (мг/л)	135	295

σ – стандартное отклонение.

Также наблюдалась разница в конверсии аммиака и нитритов. В обоих экспериментах АОВ-активность проявилась к 6–7-м суткам, что выразилось в нарастании NO<sub>2</sub><sup>-</sup>. Однако амплитуда нитритного пика в эксперименте №1 составила 6,0 мг/л, тогда как в эксперименте №2 – 10,0 мг/л (на 40% выше). Высокая концентрация свободной азотистой кислоты (HNO<sub>2</sub>), образующейся при низком рН (7,27–7,5), ингибирует NOB значительно сильнее, чем при щелочном рН [1]. Это объясняет задержку второй фазы нитрификации в эксперименте 2 и появление вторичного нитритного пика на 12–14-е сутки (NO<sub>2</sub><sup>-</sup> повторно возросли до 2,5 мг/л), что свидетельствует о нестабильности NOB-популяции.

В эксперименте №1 нормализация NO<sub>2</sub><sup>-</sup> до уровня <0,5 мг/л достигнута к 13-м суткам, тогда как в эксперименте №2 – лишь к 18-м. Таким образом, применение электролизной обработки ускорило вывод биофильтра на рабочий режим на 5 суток (~28%).

Таким образом, обработка водного раствора в электротехнологическом модуле оказывает стабилизирующее воздействие также и на окислительно-восстановительный потенциал. В эксперименте №1 ОВП устойчиво удерживался в диапазоне -68...-93 мВ (σ=6,9 мВ), что соответствует восстановительной среде с высоким содержанием растворённого H<sub>2</sub> – продукта катодной реакции

электролиза. В эксперименте №2 ОВП демонстрировал значительные колебания ( $-12\dots-89$  мВ;  $\sigma=16,0$  мВ) – в 2,3 раза выше. Стабильный отрицательный ОВП, по данным исследований, позволяет повысить устойчивость живых организмов к условиям среды [5].

**Заключение.** Проведённое исследование показало, что электролизная обработка циркулирующей воды в модельной системе биологической фильтрации УЗВ обеспечивает стабилизацию pH в приемлемом для нитрификаторов диапазоне 8,40–8,86 ( $\sigma = 0,131$  vs 0,373 без электролиза) за счёт генерации гидроксид-ионов на катоде. Также она позволяет добиться снижения максимальной концентрации нитритов в ходе эксперимента на 40% (6,0 vs 10,0 мг/л), что критически важно для предотвращения токсической нагрузки на гидробионтов. Кроме того, наблюдалось ускорение выхода биофильтра на рабочий режим ( $\text{NO}_2^- < 0,5$  мг/л) приблизительно на 5 суток (~28%) вследствие более благоприятных условий для роста нитрит-окисляющих бактерий. Результаты подтверждают перспективность включения электротехнологических модулей в контур УЗВ для оптимизации процесса запуска биофильтра.

#### Список использованных источников

1. 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.
2. Keuter, S. Longterm Monitoring of Nitrification and Nitrifying Communities during Biofilter Activation of Two Marine Recirculation Aquaculture Systems (RAS) / S. Keuter [et al.] // Int J Aquac Fish Sci. – 2017. – Vol. 3(3). – P. 051–061. DOI: 10.17352/2455-8400.000029.
3. Ben-Asher, R. Electrochemical applications in RAS: A review / R. Ben-Asher, O. Lahav // Reviews in Aquaculture. – 2024. DOI: 10.1111/raq.12822.
4. Черныш, Е.Ю. 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.
5. Шикунец, А. Б. Предварительная оценка применения AORPs-технологий при работе с аэробным активным илом очистных сооружений / А. Б. Шикунец, В. Н. Штепа, Е. М. Глушень // Инженерно-экологические аспекты и перспективы развития систем водоснабжения и водоотведения : сб. научн. статей Междунар. науч.-практ. конф., Брест, 28 марта 2025 г. / Брест. гос. техн. ун-т ; редкол.: А. А. Волчек [и др.] ; науч. ред. А. А. Волчек, О. П. Мешик, С. В. Андреюк. – Брест : БрГТУ, 2025. – С. 106–109.