



Гибридные технологии улучшения качества возвратных вод, для гидроэкологии биотехнических рыбоводных экосистем

<https://doi.org/10.36038/0131-6184-2025-1-17-27>

EDN: XXLYBM

Научная статья
УДК 628.16: 608.3

Белов Виктор Леонидович – аспирант, Факультет биотехнологий и рыбного хозяйства, Москва, Россия

Горбунов Александр Вячеславович – кандидат биологических наук, ведущий научный сотрудник, Факультет биотехнологий и рыбного хозяйства, ФГБОУ ВО «МГУТУ им. Разумовского (ПКУ)», Москва, Россия

E-mail: akvabiotex@rambler.ru

Брежнев Леонид Леонидович – заведующий лабораторией, Факультет биотехнологий и рыбного хозяйства, ФГБОУ ВО «МГУТУ им. Разумовского (ПКУ)», Москва, Россия

E-mail: brezhnev2011@list.ru

Шкель Андрей Анатольевич – кандидат химических наук, доцент кафедры биологии и биоинформатики, Факультет биотехнологий и рыбного хозяйства, ФГБОУ ВО «МГУТУ им. Разумовского (ПКУ)», Москва, Россия

Лебедев Олег Юрьевич – коммерческий директор, ООО «Александра-Плюс»

Адреса:

1. ФГБОУ ВО «МГУТУ им. Разумовского (ПКУ)» – Россия, 119049, Москва, ул. Шаболовка, д. 14, стр. 9
2. ООО «Александра-Плюс» – Россия, 160004, г. Вологда, ул. Благовещенская, д. 102

Аннотация. В данной статье представлены результаты 5-го этапа НИОКТР №361-1/21 (РОСРИД №122050400136-6) предварительных испытаний гибридных безреагентных технологий улучшения качества возвратных вод для гидроэкологии биотехнических рыбоводных экосистем – БРЭ (УЗВ и СОВ) на основе единого светозвукового поля, выполненные на базе опытных устройств корпусного напорного и погружного (канального) безнапорного типа (УФУЗ), проведенных на действующем рыбоводном предприятии холодноводной аквакультуры. Контролировались качественные нормативно-рыбоводные показатели: цветность, мутность, БПК₅, БПК_{полн}, перманганатная окисляемость. Оценивалось гидроэкологическое благополучие промышленной БРЭ по комплексному показателю вредности устройства (технологии) по показателям назначения. Определено, что научно обоснованный и практически апробированный баланс мощности и правильность подбора светозвукового поля способны сформировать или технологическую опасность, или безопасность устройств с гибридной акватехнологией.

Ключевые слова: гидроэкология, аквакультура, УФУЗ, ультрафиолет, ультразвук, светозвуковое поле, биотехническая рыбоводная система, гибридные технологии

Для цитирования: Белов В.Л., Горбунов А.В., Брежнев Л.Л., Шкель А.А., Лебедев О.Ю. Гибридные технологии улучшения качества возвратных вод, для гидроэкологии биотехнических рыбоводных экосистем // Рыбное хозяйство. 2025. № 1. С. 17-27. <https://doi.org/10.36038/0131-6184-2025-1-17-27>

HYBRID TECHNOLOGIES FOR IMPROVING THE QUALITY OF RETURN WATERS, FOR THE HYDROECOLOGY OF BIOTECHNICAL FISH FARMING ECOSYSTEMS

Viktor L. Belov – Postgraduate Student, Faculty of Biotechnology and Fisheries, Moscow, Russia

Alexander V. Gorbunov – Candidate of Biological Sciences, Senior Researcher, Faculty of Biotechnology and Fisheries, MGUTU named after Razumovsky (PCU), Moscow, Russia

Leonid L. Brezhnev – Head of the Laboratory, Faculty of Biotechnology and Fisheries, MGUTU named after Razumovsky (PCU), Moscow, Russia

Andrey A. Shkel – Candidate of Chemical Sciences, Associate Professor of Biology and Bioinformatics, Faculty of Biotechnology and Fisheries, MGUTU named after Razumovsky (PCU), Moscow, Russia

Oleg Yu. Lebedev – Commercial Director, “Alexandra-Plus” LLC

Addresses:

1. **Moscow State University of Technology and Management named after K.G. Razumovsky** – Russia, 119049, Moscow, Shabolovka str., 14, p. 9

2. **“Alexandra-Plus” LLC** – Russia, 160004, Vologda, Blagoveshchenskaya str., 102

Annotation. This article presents the results of the 5th stage of R&D No.361-1/21 (ROSRID No. 122050400136-6) preliminary tests of hybrid reagentless technologies for improving the quality of return waters for the hydroecology of biotechnical fish farming ecosystems - BRE (USV and SOV) based on a single light and sound field, performed on the basis of experimental pressure hull and submersible (channel) of a pressure-free type (UFUZ), conducted at an existing cold-water aquaculture fish hatchery. Qualitative normative fish farming indicators were monitored: chromaticity, turbidity, BPK₅, BPKF, permanganate oxidizability. The hydroecological well-being of industrial BRE was assessed according to a complex indicator of the harmfulness of the device (technology) in terms of purpose. It is shown that a scientifically based and practically proven power balance and the correct selection of the light and sound field can form either a technological hazard or the safety of devices with hybrid aquatechnology.

Keywords: hydroecology, aquaculture, UFUZ, ultraviolet, ultrasound, light and sound field, biotechnical fish farming system, hybrid technologies

For citation: Belov V.L., Gorbunov A.V., Brezhnev L.L., Shkel A.A., Lebedev O.Y. (2025). Hybrid technologies for improving the quality of Return Waters for the hydroecology of Biotechnical fish farming Ecosystems. // Fisheries. No. 1. Pp. 17-27. <https://doi.org/10.36038/0131-6184-2025-1-17-27>

Рисунки и таблицы – авторские / The drawings and tables were made by the author

ВВЕДЕНИЕ

Гидроэкология – это наука с большим прикладным значением, которая изучает закономерности жизни преимущественно на надорганизменных уровнях – популяционном, биоценотическом и экосистемном, в неразрывной связи с условиями водной среды и близлежащих территорий. Она опирается на закономерности, установленные для других уровней организации живых систем, но имеет свои подходы и методы исследования биологических и иных естественных процессов, происходящих в водной среде. В последнее время важное значение приобрели составные части гидроэкологии – биобезопасность и водная токсикология. Вместе с тем, в гидроэкологии сформировались свои интегральные подходы к изучению и оценке структуры и функционирования водных экосистем, в т.ч. и биотехнических, как сложных систем [1; 2].

Гибридные акватехнологии – это объединение двух или более типов водных технологий для достижения лучших результатов и решения сложных задач. Они включают в себя различные комбинации, например, как в нашем случае, использование комбинации ультрафиолетового излучения (УФ) и ультразвука (УЗ) для создания единого светозвукового поля (УФУЗ), воздействующего на технологические воды аквакультуры.

Биотехническая рыбоводная экосистема (БРЭ) – это система, включающая в себя не только различные культивируемые виды рыб и иные сопутствующие гидробионты, но и технические средства, т.е. специализированное оборудование для их разведения, выращивания и контроля. Такие биотехнические экосистемы могут быть разных типов, основываться на технологических установках замкнутого водообеспечения (УЗВ) и системах оборотного водоснабжения (СОВ), которые могут использоваться как для получения живой рыбопродукции, так и для восстановления водных биоресурсов (воспроизводство рыбных запасов). В условиях постоянно загрязняющейся окружающей среды рыбоводные УЗВ представляются сегодня драйвером развития отечественной аквакультуры, в которых происходит культивирование водных гидробионтов в контролируемых условиях, при этом аквакультура несет в себе огромную

ценность при обеспечении продовольственной безопасности нашей страны [2].

Безреагентные акватехнологии – это технологии, которые не используют химические реагенты для очистки или улучшения вод. К таким технологиям относятся, например, озонирование, аэрация, обратный осмос и ультрафильтрация. Эти методы эффективны для удаления различных загрязнителей, таких как железо, марганец, сероводород и другие. В промышленной аквакультуре, на основе УЗВ или СОВ, постоянно ведутся исследовательские работы в области методов и способов более качественной очистки применяемых вод, среди которых можно выделить системы с совмещением УФ и озонирования, применение различных сорбентов и различные окислительные процессы [3; 4] и другие способы.

Низкую степень внедрения гибридных технологий в отечественную промышленную аквакультуру можно объяснить практическим отсутствием адаптированных под применение в аквакультуре технологий и соответствующего оборудования с биобезопасными технико-технологическими параметрами, а также – не допускающих при своей работе образования побочных продуктов (токсикантов) или иных образований и гидрокомплексов опасных для рыб [5; 6]. Кавитационные УЗ-системы при этом выступают на текущий момент достаточно эффективным методом деструкции органических поллютантов сточных вод [3].

С целью создания высокотехнологичных гибридных технологий для промышленной аквакультуры были проведены, в условиях действующих предприятий холодноводной аквакультуры, испытания опытных образцов устройств УФУЗ для рыбоводных УЗВ и СОВ корпусного (модель ECO-7A460H200US) и погружного (модель ECO-6A610G1US) типов (изготовитель ООО «Александра-Плюс», г. Вологда, РОСРИД № 122050400136-6), которые проводились в соответствии с план-графиком НИОКТР №361-1/21 от 21.12.2021 г. (май-июнь 2024 г.) по теме: «Промышленное освоение технологии производства оборудования ультрафиолетовой очистки и ультразвуковой деструкции органического вещества для улучшения качества водной среды и водоподготовки в аквакультуре», реализуемых

в рамках Постановления Правительства РФ от 9 апреля 2010 года № 218 «Об утверждении Правил предоставления субсидий на развитие кооперации российских образовательных организаций высшего образования, государственных научных учреждений и организаций реального сектора экономики в целях реализации комплексных проектов по созданию высокотехнологичных производств». Основные технико-технологические параметры испытываемых образцов с гибридными акватехнологиями приведены в описании соответствующих полезных моделей, заявленных в Роспатент для регистрации (сентябрь 2024 г.).

УСЛОВИЯ И ОБЩАЯ МЕТОДОЛОГИЯ ИСПЫТАНИЙ

Испытания проводились на базе нескольких предприятий товарной аквакультуры, не нарушая имеющиеся производственные циклы, логистику и прочие, свойственные имеющемуся производству и обслуживанию оборудования, процессы, в 2 очереди: 1 – расположенное в Ропше Ленинградской области; 2 – расположенное в г. Кондорово Калужской области (дополнительные испытания), где были поэтапно проинсталлированы опытные образцы установок УФУЗ. Установки на обоих предприятиях, по согласованию с технологом или главным рыбоводом предприятия, размещались в системах водоподготовки как финальная ступень, т.е. сразу после штатной биофльтрации перед подачей возвратных технологических вод аквакультуры в рыбоводные ёмкости (каналы).

Предприятие 1 – основное, является государственным индустриальным и научно-технологическим объектом, специализирующимся на культивировании лососевых видов рыб, технологически ориентированным на 60-80 т товарной рыбы в год, со штатными возможностями 2-4-х кратного оборота воды в час при автоматизированном кормлении. Предприятие применяет технологии как оборотного

(в бетонных бассейнах), так и замкнутого водообеспечения (в пластиковых бассейнах) для воспроизводственных целей собственного рыболовского материала, выполненных на общих скважинных водоресурсах.

Предприятие 2 – задействовано для проведения дополнительных испытаний, является объектом среднего бизнеса воспроизводственного типа (пластиковые бассейны с УЗВ) и с бассейнами для подращивания личинок рыб (бетонные бассейны с СОВ) с водооборотом не более 1-1,5 раза в час и специализирующимся на воспроизводстве и продаже для товарного выращивания малька форели и сома, в объемах на 2024 г. не превышающих 100 тыс. штук в год.

Технологические воды предприятий (входные воды в устройства, контроль) аквакультуры характеризуются по ОСТ 155.372-87 «Охрана природы, гидросфера, вода для рыбоводных хозяйств, общие требования и нормы». Для форели (лососевые) – температура воды (не более 20 °С), O₂ (мг/л: не ниже 5,0), pH (6,5-8,0), учитывая требования Приказа Министерства сельского хозяйства Российской Федерации (от 13.12.2016 № 552 «Об утверждении нормативов качества воды водных объектов рыбохозяйственного значения, в том числе нормативов предельно допустимых концентраций вредных веществ в водах водных объектов рыбохозяйственного значения») и обеспечения выполнения требований предприятиями аквакультуры самостоятельно в рабочем порядке на профессиональном уровне.

По условиям НИОКТР, на данных предприятиях проверялось комплексное улучшение нормативных рыбоводных показателей назначения опытных образцов на выходе из устройств УФУЗ: БПК₅, БПК_{полн} (по Приказу МСХ РФ от 13.12.2016 №552); цветность, перманганатная окисляемость; мутность, руководствуясь ОСТ 155.372-87 (табл. 1). Оценка гидроэкологического состояния БРЭ после водоподготовки, с учетом её обработки на УФУЗ,

Таблица 1. Контролируемые показатели измерений и их нормативные значения / **Table 1.** Controlled measurement parameters and their normative values

№	Наименование контролируемого показателя	Ед. изм.	Нормативное значение
1	Цветность	град. ПКШ	≤ 30
2	Мутность	ЕМФ	≤ 2
3	ПМО	гО/м ³	≤ 10
4	БПК ₅	мг/дм ³	≤ 2,1
5	БПК _{полн} (расчётно)	мг/дм ³	≤ 3,0

проводилась через комплексный «показатель вредности» (С) – это мера оценки воздействия различных факторов среды на её экологическое состояние, влияющее на жизнеспособность культивируемых рыб.

В практике аналитических работ, как наименее трудоёмкий способ, для получения БПК_{полн}, значение БПК₅ умножают на коэффициент 1,43, согласно п. 23.2 Методики исчисления размера вреда, причиненного водным объектам вследствие нарушения водного законодательства, утвержденной Приказом Минприроды России от 13.04.2009 № 87 «Об утверждении Методики исчисления размера вреда, причиненного нарушения водного законодательства» (с изменениями на 26.08.2015 г.), что и было применено в нашем случае.

В связи с динамическими характеристиками контролируемых показателей в водах аквакультуры и ранее разработанной РЦТУ.272354.001-МОК (методика оценки качества воды), среднее значение флюктуации контролируемых показателей в водах аквакультуры до ±40%, относительно контроля, является допустимым рабочим параметром.

«Признак вредности» (С, безразмерная величина) определяется как сумма отношений величины каждого контролируемого показателя (*np*), делённый на нормативно максимален допустимый уровень (*нрм*) каждого из них, соответственно (1), чем меньше величина рассчитанного признака вредности, тем лучше:

$$C_{np}(k) = \sum \left(\frac{\text{Цветность}}{30} + \frac{\text{Мутность}}{2} + \frac{\text{ПМО}}{10} + \frac{\text{БПК}_5}{2,1} + \frac{\text{БПК}_{полн}}{3} \right) \quad (1)$$

Этот универсальный комплексный показатель используется для мониторинга состояния технологических водоемов, технологий, биобезопасности и принятия решений по управлению аквакультурой [4]. При этом, критериями гидроэкологического риска, испытываемой гибридной технологии для БРЭ, заложенной в опытных образцах УФУЗ, считаются такие значения показателя С, которые по результатам испытаний (среднего значения дат забора проб по схеме испытаний (табл. 2) на выходе из устройства (*np* – проба), превышают значения, полученные на входе в него (*k* – контроль), с учетом допустимой рабочей флюктуации, т.е. когда комплексный показатель $C_{np} > S_k$.

Анализ водных проб производился в аккредитованной по ГОСТ 16504-81 испытательной лаборатории (г. Москва, сертификат об аккредитации RA.RU.210M11 от 25.11.2021 г.). Количественные значения показателей назначения на входе и выходе с УФУЗ определялись по:

- БПК – ПНД Ф 14.1:2:3:4.123-97 методика выполнения измерений биохимического потребления кислорода после *n* дней инкубации в поверхностных пресных, подземных (грунтовых), питьевых, сточных и очищенных сточных водах;
- мутность – ГОСТ Р 57164;
- ПМО – ПНД Ф 14.1:2:4.154-99 Количественный химический анализ вод. Методика выполнения измерений перманганатной окисляемости в пробах питьевых, природных и сточных вод титриметрическим методом;
- цветность – ГОСТ 31868 метод Б.

Для организации пробоотбора сотрудниками головной организации, в условиях промышленного предприятия, в целях безопасности труда, каждый образец устройства испытаний был специально оснащен сконструированной системой отбора контрольных проб, до и после прохождения через него технологических вод. Отбор проб производился согласно инструкции испытательной лаборатории.

В случае получения отрицательных результатов предусматривалась технологическая доработка устройства разработчиком по рекомендациям головного исполнителя и проведение повторных испытаний.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

При проведении испытаний гибридной технологии корпусной УФУЗ (модель ЕСО-7А460Н200US, модификация 1) на 1-ом предприятии аквакультуры, согласно схеме испытаний (табл. 2), в апреле-мае 2024 г. был проведен 5-ти кратный забор водных проб до и после выхода из устройства, через условно равные промежутки времени, в среднем 72 ч (рис. 1). Пробы были в течение суток доставлены и переданы для анализа в испытательную лабораторию.

Исходя из приведенных выше данных и расчёта на их основе представительной гидроэкологической характеристики через усредненный показатель вредности, следует, что $S_k = 2,38$ (на входе), а $C_{np} = 2,25$ (на выходе), т.е. устройства действительно улучшили комплексным образом заявленные гидроэкологические качественные показатели назначения обработанных вод на 5,4% в период испытательного цикла. Все контролируемые показатели во время испытаний находились при этом в зоне рыбоводно-нормативных требований.

Испытания гибридной технологии канальной (погружной) УФУЗ (модель ЕСО-6А10G1US, модификация 1), согласно схеме испытаний (табл. 2), проводились параллельно

но, также на 1-ом предприятии аквакультуры в апреле-мае 2024 г., был соответствующим образом проведен 5- кратный забор водных проб до и после выхода из устройства, через условно равные промежутки времени, в среднем 72 ч (рис. 2). Пробы были в течение суток доставлены и переданы для анализа в испытательную лабораторию.

Исходя из приведенных выше данных и расчёта на их основе представительной гидроэкологической характеристики через усредненный показатель вредности, следует, что $Sk=2,38$ (на входе), а $Sp=5,03$ (на выходе), т.е. вынесенное на испытания устройство,

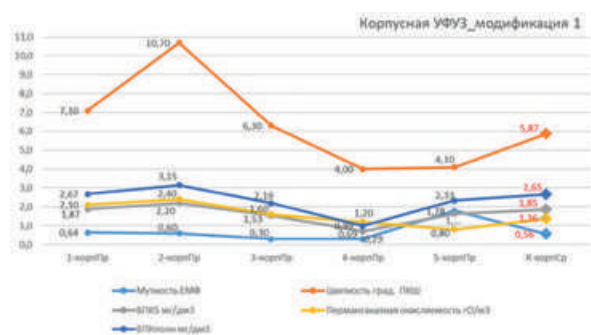


Рисунок 1. Динамические изменения значений проб (X-корпПр) при реализации схемы испытаний корпусной УФУЗ модификации 1 на аквакультурном предприятии 1 и их средне-контрольное значение на входе устройства (K-корпСр)

Figure 1. Dynamic changes in sample values (X-Corpr) during the implementation of the test scheme of the UFA hull modification 1 at the aquaculture enterprise 1 and their average control value at the device inlet (K-corpSr)

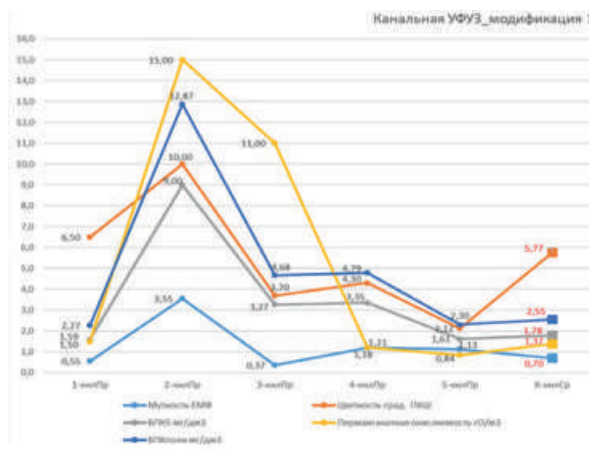


Рисунок 2. Динамические изменения значений проб (X-кнлПр) при реализации схемы испытаний канальной УФУЗ модификации 1 погружного типа на аквакультурном предприятии 1 и их средне-контрольное значение на входе устройства (K-кнлСр)

Figure 2. Dynamic changes in the sample values (X-kn l Pr) during the implementation of the test scheme of the channel UFA modification 1 of the submersible type at the aquaculture enterprise 1 and their average control value at the input of the device (K-knlSr)

явно ухудшило заявленные гидроэкологические качественные показатели назначения обработанных вод на -111,7% в период испытательного цикла, т.е. оно гарантировано спровоцировало бы потенциальные гидроэкологические риски при его постоянном применении в системе водоподготовки БРЭ, что могло бы повлечь специфические заболевания, а в перспективе – и гибель культивируемых объектов рыбоводства. Все контролируемые показатели

Таблица 2. Схема цикла испытаний УФУЗ на предприятии аквакультуры / **Table 2.** Scheme of the UFUZ test cycle at an aquaculture enterprise

Параметр контроля	Тип значения	Проба 1 на контрольную дату	Проба 2 на контрольную дату	Проба 3 на контрольную дату	Проба 4 на контрольную дату	Проба 5 на контрольную дату
Мутность	факт. значение	+	+	+	+	+
	контроль	+	+	+	+	+
Цветность	факт. значение	+	+	+	+	+
	контроль	+	+	+	+	+
БПК ₅	факт. значение	+	+	+	+	+
	контроль	+	+	+	+	+
Перманганатная окисляемость	факт. значение	+	+	+	+	+
	контроль	+	+	+	+	+

на входе в устройство находились в зоне рыбо-водно-нормативных требований, а вот на выходе из него, во 2-й и 3-й пробах испытаний существенно превышали номинальные нормативные показатели по БПК и ПМО. Вызвал вопросы также показатель мутности, который во 2-й пробе превысил свои нормативные величины почти в 2 раза, полагаем из-за чрезмерно мощной кавитации, преобразующий пришедшую органику, при интенсивном кормлении рыб, в мелкодисперсную взвесь, которая напрямую прошла в БРЭ и включилась в дальнейший водо-оборот.

Очевидно, данный факт можно связать с какими-либо внешними количественными особенностями кормления в этот период, или состав применяемого корма, или технологическими аспектами эксплуатации штатной системы водоочистки. Вместе с этим, технические характеристики источников светозвукового поля в данной модификации УФУЗ, значительно разнились в большую сторону с характеристиками корпусного устройства, успешно прошедшего испытания на данном же предприятии. Помимо этого, технические стенки пробоотборных устройств мешали свободному водотоку через устройство, что, в свою очередь, могло спровоцировать создание в корпусе установки турбулентных потоков и застойные зоны, снижающие эффективность устройства. Изготовителю было предложено доработать (или перевыпустить) данное устройство УФУЗ модификации 1 погружного типа конструкционно, привести в соответствие воздействующие характеристики светозвукового поля в соответствии с образцом корпусного типа и откалибровать его, после чего повторить испытания.

Испытания доработанной и перевыпущенной канальной (погружной) УФУЗ (модели ЕСО-14А460G1US в модификации 2, с откалиброванной гибридной технологией) были организованы на 2-ом предприятии аквакультуры в июне-июле 2024 г., согласно установленной схеме испытаний (табл. 2). Был также проведен 5-ти кратный забор водных проб до и после выхода из устройства через условно равные промежутки времени – в среднем 72 ч (рис. 3). Пробы были в течение суток доставлены и переданы для анализа в испытательную лабораторию.

Исходя из выше приведенных данных и расчёта на их основе представительной гидроэкологической характеристики через усредненный показатель вредности, следует, что $S_k=2,08$ (на входе), а $S_{np}=1,77$ (на выходе), т.е. устройство улучшило комплексным образом заявленные гидроэкологические качественные показатели назначения обработанных вод на 14,5%

в период испытательного цикла. Все контролируемые показатели во время испытаний находились при этом в зоне рыбоводно-нормативных требований.

ОБСУЖДЕНИЕ И АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ

Оценка гибридных технологий для аквакультуры представляет из себя отдельную специфическую сложность и должна проводиться с пониманием возможной биологической опасности от гидроэкологических рисков для водной среды, в которой культивируются объекты аквакультуры. Показателем такого комплексного риска может выступать «показатель вредности», который, в зависимости от целей исследователя, может включать различные факторы, влияющие на здоровье рыб и их способность к размножению. Эти факторы могут включать температуру воды, уровень кислорода, солёность, наличие загрязняющих веществ и другие показатели. Некоторые из параметров, включаемые исследователями в этот показатель, могут быть качественными, обще-санитарными или санитарно-токсикологическими и т.д., в зависимости от решаемых задач, которые способны учесть различные аспекты внешних антропогенных, техногенных и технологических воздействий, например, через вкус, цвет, запах воды, а также – на здоровье потребителей через токсины. Существуют, например, лимитирующие показатели вредности, которые учитывают опасность и концентрацию растворённых в воде загрязнителей, при которой среда становится опасной для организма многих гидробионтов [5]. В силу вышесказанного, учитываемые в нашем показателе вредности факторы качества технологических вод: цветность, мутность, ПМО, БПК5 и БПКполн способны помочь оценить общее состояние рыбоводной системы и принять соответствующие меры для нормализации среды культивирования рыб и сопутствующих обитателей рыбоводных водоёмов.

Так, основной показатель качества вод аквакультуры по Приказу МСХ РФ №552 это БПК (биологическое потребление кислорода) – один из важнейших критериев уровня загрязнения водной экосистемы органическими веществами. Он определяет количество легко-окисляющихся органических, загрязняющих веществ в воде. БПК используется для оценки качества воды и определения степени её пригодности для жизни гидробионтов, таких как рыбы, ракообразные и микроорганизмы. Известны научные исследования по влиянию БПК в рыбоводстве, которые проводились с целью изучения кинетики этого процесса в пробах воды из различных водоёмов Каре-

лии и Белого моря. Исследования проводились в условиях двух температур (10 и 20 °С) и выявили особенности развитие БПК по «кажущейся экспоненте» (КЭ) в течение 30-80 сут. с начала эксперимента в ряде исследованных проб воды. Это отличается от классического случая, когда окисление автохтонного органического вещества проходит за первые 15-20 сут. с начала эксперимента по экспоненциальной кривой. Проведено сравнение значений кинетических параметров развития кривых БПК, рассчитанных как по КЭ, так и по экспоненте за 15-20 суток. Выявлено, что в дальнейшем кинетические параметры длительных БПК-тестов могут быть использованы совместно с характеристиками органического вещества воды для оценки особенностей ее качества. Были определены и объяснены условия формирования такой кривой, а также процесс образования характерных типов кривых БПК при различных температурных условиях. Так, например, показано, что экспоненциальный тип развития БПК обычно означает активное развитие процесса с начала эксперимента за первые 15-20 сут., после чего происходит выход БПК на т.н. плато, которое означает либо завершение процесса окисления органики, либо связано с полным расходом растворенного O₂ в исследуемой воде. Линейный тип развития БПК характерен для относительно чистых от загрязнителей проб. Целью дальнейших исследований, определена оценка соответствия между кинетикой процессов БПК и составом органических веществ в исследуемых водах под антропогенным воздействием на водные экосистемы, то есть на технологические процессы, осуществляемые человеком, например, интенсивное применение комбикормов, сбросы (спуски) вод в бассейнах, увеличение плотности посадки товарной рыбы, эпизоотические меры профилактики заболеваний в БРЭ и некоторые другие [7].

Научных исследований по перманганатной окисляемости (ПМО) в рыбоводстве проводилось немного. Однако этот показатель важен для оценки качества воды и определения степени её пригодности для жизни гидробионтов, таких как рыбы и микроорганизмы. Перманганатная окисляемость – количество кислорода, потребляемое при химическом окислении содержащихся в воде органических и неорганических веществ. Поскольку окисляемые неорганические вещества, как правило, в воде присутствуют в незначительных количествах, то принято считать, что перманганатная окисляемость отражает общее содержание в воде органических веществ. Поэтому регулирование перманганатной окисляемости в рыбо-

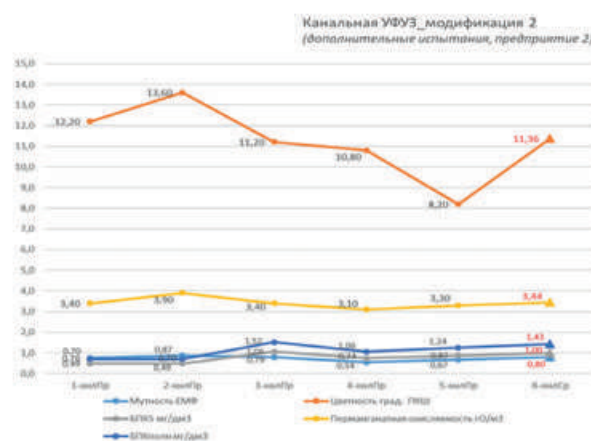


Рисунок 3. Динамические изменения значений проб (X-кнл/л) при реализации схемы испытаний канальной УФУЗ модификации 1 погружного типа на аквакультурном предприятии 1 и их средне-контрольное значение на входе устройства (K-кнл/л)

Figure 3. Dynamic changes in the sample values (X-kn l Pr) during the implementation of the test scheme of the channel UFA modification 1 of the submersible type at the aquaculture enterprise 1 and their average control value at the input of the device (K-kn l Sr)

водстве включает сегодня использование различных методов очистки и контроля качества воды [8]:

1. Использование угольных фильтров для удаления органических веществ.
2. Ионный обмен с использованием смесей ионообменных смол для сорбции органических веществ.
3. Добавление в воду окислительных агентов, таких как гипохлорит или перекись водорода для дезинфекции и защиты от микробиологического загрязнения.
4. Применение обратного осмоса для удаления органики из воды.

Показатель мутности в рыбоводстве также имеет важное значение, так как он отражает качество воды и её прозрачность. Высокая мутность может привести к снижению количества растворённого кислорода в воде, что негативно сказывается на жизнедеятельности рыб и других водных организмов. Исследования мутности в аквакультуре включают гидрохимические и бактериологические анализы рыбоводных водоёмов, контроль над средой обитания рыб и оценку состояния водоёмов. Также проводятся анализы воды по следующим показателям: рН, цветность, мутность, перманганатная окисляемость, жёсткость, сульфаты, хлориды, нитраты, нитриты, аммонийный азот, СПАВ,

общая минерализация и окислительно-восстановительный потенциал [3].

Показатель цветности в рыбоводстве важен для определения качества воды и её пригодности для выращивания рыбы. Он характеризует содержание органических веществ растительного происхождения, таких как гумус, которые придают воде буроватый оттенок. Технологическая норма для карповых прудов составляет длину волны 550-580 нм, что соответствует жёлто-зелёному или зелёно-жёлтому цвету. Для исследования цветности вод используют специальные методы и методики, такие как научный метод (изучение методической и дополнительной литературы), визуальное обследование водоёма, отбор проб воды для физико-химического анализа, оценка интенсивности и характера запаха, определение цветности воды при помощи цилиндра и листа белой бумаги, определение прозрачности воды при помощи читаемости шрифта определённого размера и изучение осадка путём отстаивания воды определённого объёма. НИР для аквакультуры по цветности воды включает проведение гидрохимических, токсикологических, бактериальных и паразитологических анализов проб воды из водоисточника. Это позволяет определить соответствие качества воды рыбохозяйственным требованиям и выбрать подходящие методы водоподготовки, такие как аэрация и очистка воды [9].

Деструкция органики ультразвуком – это известный процесс в водоочистке сточных вод, при котором ультразвуковые волны разрушают клетки органических веществ; ультразвуковое воздействие приводит к переходу порога кавитации, в результате чего клетки разрушаются [9]. Деструкция органического вещества ультразвуком в воде основана на явлении кавитации, которое возникает при воздействии ультразвуковых волн определённой частоты и интенсивности. Кавитация вызывает рост пузырьков газа в воде, где возникают области высоких давлений и локальных разряжений, что приводит к дроблению органических веществ до субмикронных размеров и облегчает их окисление и удаление из воды. Так, это приводит к дроблению воды до субмикронных размеров с резким уменьшением, вплоть до 1 мин, времени окисления кислородом воздуха двухвалентного железа ($Fe + 2$) до трехвалентного ($Fe + 3$), при этом также окисляются примеси марганца. Это связано с тем, что скорость распространения звуковых волн в водно-воздушной среде сильно падает и достигает минимума при 27 м/с. В Университете Purdue (США) был разработан эффективный метод использования ульт-

развука для очистки воды, который заключается в разрушении примесей органического происхождения под действием кавитации, сопровождающейся сонолюминесценцией, когда в лопающемся пузырьке при высоких температурах и давлении находится газ, который светится. Этого излучения, в сочетании с температурным и манометрическим воздействием, оказывается достаточно для разрушения примесей органического происхождения. Предполагается, что ультразвуковые технологии в будущем будут удачной альтернативой традиционным методам, использующим хлор и озон [11].

Перспективной гибридной технологией в водоподготовке для промышленных и городских сточных вод, например, считается мембранная биоаугментация (MBR). Эта технология объединяет мембранное разделение и биоаугментацию, используя микроорганизмы для очистки сточных вод. MBR-реакторы имеют небольшую площадь для биологической очистки, увеличивая мощность очистных сооружений без увеличения площади конструкций. На рынке представлены два основных типа MBR – системы с вакуумным (или гравитационным) потоком и системы под давлением. Вакуумные системы погружаются в воду и имеют мембраны, установленные либо внутри биореакторов, либо в последующем резервуаре. Второй тип MBR, где поток управляется давлением, представляет собой внутритрубные картриджные системы, расположенные вне биореактора. Основной недостаток технологии – высокая стоимость обслуживания (мембраны часто забиваются). Облучение, обычно используют для обеззараживания водной среды, но некоторые методы, например, ионизирующее облучение в сочетании с добавлением озона или перекиси водорода улучшают эффективность разложения органических примесей, включая пестициды и фенолы.

Современные системы УФ-обработки предлагают применять вместо амальгамных ультрафиолетовых ламп светодиодные. Сейчас такие лампы начинают активно внедрять в коммунальном секторе, а также используются NASA в космических разработках агентства. Ещё одна технология – это гидрооптический способ, который позволяет использовать несколько раз энергию фотонов, так как ультрафиолетовые лучи отражаются от стенок кварцевой камеры, что повышает эффективность дозы УФ-облучения для уничтожения сложных вирусов, например, коронавируса или аденовируса [12]. Элементы такой технологии присутствуют и в конструктиве наших устройств, однако не являлись проектными решениями разра-

ботчика. Вместе с этим, испытанные УФУЗ, с реализованными в них гибридными технологиями, не требуют расходных материалов, что значительно влияет на их эксплуатационно-экономические характеристики.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Запланированные текущим отчетным этапом НИОКТР №361-1/21 от 21.12.2021 г. предварительные испытания выполнены в полном объеме, получены показания всех заявленных параметров назначения испытываемых устройств. Кроме того, проведены дополнительные испытания доработанного устройства погружного УФУЗ безнапорного типа, в связи с неудовлетворительными результатами представленной модификации устройства

Полученные результаты позволяют сделать несколько обоснованных выводов о том, что важен баланс как в «мощностях» технико-технологических источников применяемых воздействий (в нашем случае УФ и УЗ излучений), так и проведение калибровки создаваемых физических полей воздействия, которые могут послужить источником опасности для водных обитателей аквакультурных экосистем. В нашем случае это было зафиксировано при испытаниях канальной погружной УФУЗ (модификация 1), ввиду избыточной мощности ультразвуковых излучателей рассинхронизированных с установленными УФ излучателями, что привело к нарушению единства параметров рабочего светозвукового поля, в результате чего возникла опасность генерации контролируемых гидроэкологических параметров, связанных с окислительными процессами в РБЭ и кислородным режимом. Калибровка рабочего светозвукового поля предназначена как раз для обеспечения правильного воздействия векторного потенциала электромагнитного поля при решении необходимых физических задач в устройстве. Калибровка также служит для упрощения возможности наложения дополнительных условий на воздействующий векторный потенциал поля к объекту воздействия (водный поток через УФУЗ в нашем случае).

Кроме того, опасность для гидробионтов лежала еще в излишне мощных кавитационных процессах, при которых образуются опасные для гидробионтов радикалы ОН (3), и разбиваются в микродисперсную взвесь остатки несъеденной рыбой и, ранее неотфильтрованного системой очистки, комбикорма. Научно обоснованный и практически апробированный баланс мощности и пра-

вильность подбора светозвукового поля способны сформировать или технологическую опасность (канальная УФУЗ модификации 1 для СОВ) или безопасность устройств с гибридной технологией для применения в индустриальной аквакультуре (корпусная УФУЗ модификации 1 для УЗВ, канальная УФУЗ модификации 2 для СОВ).

По результатам успешных испытаний, проведенных по 5-му этапу НИОКТР, поданы 2 патента на полезную модель для обоих УФУЗ с гибридными акватехнологиями и близится к завершению подготовка их серийного производства, намеченная план-графиком с 2025 года.

БЛАГОДАРНОСТИ.

Данные испытания стали возможны благодаря предшествующим исследованиям и проработке данных гибридных технологий на базе уникальной научной установки (УНУ) НТИРФ Рег. №3662433 «Научно-исследовательский комплекс передовых технологий аквакультуры и гидроэкологии» факультета биотехнологий и рыбного хозяйства ФГБОУ ВО «МГУТУ им. К.Г. Разумовского (ПКУ)», авторы благодарят коллектив УНУ за профессионализм и выдвинутые замечания по сути проработки.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Испытания выполнены при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (Соглашение о предоставлении из федерального бюджета субсидии на развитие кооперации российской образовательной организации высшего образования и организации реального сектора экономики в целях реализации комплексного проекта по созданию высокотехнологичного производства № 075-11-2022-004 от 06.04.2022 г.).

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Вклад в работу авторов: Белов В.Л. – сбор и анализ данных, подготовка статьи, Горбунов А.В. – идея статьи, редактирование текста статьи, подготовка заключения, Брежнев Л.Л. – подготовка графиков и рисунков, Шкель А.А. – редактирование текста статьи, Лебедев О.Ю. – корректировка текста статьи и ее окончательная проверка

The authors declare that there is no conflict of interest. Contribution to the work of the authors: Belov V.L. – data collection and analysis, preparation of the article, Gorbunov A.V. – idea of the article, editing of the text of the article, preparation of the conclusion, Brezhnev L.L. – preparation of graphs and drawings, Shkel A.A. – editing of the text of the article, Lebedev O.Yu. – correction of the text of the article and its final verification

ЛИТЕРАТУРА И ИСТОЧНИКИ

1. Горбунов А.В., Никифоров-Никишин Д.Л., Калита Т.Л., Пономарев А.К. Технологии органической аквакультуры: Учебник для вузов / Под ред. С.В. Пономарева. М.: «Наука», 2022. 431 с.
2. Романенко В.Д. Основы гидроэкологии: учебник для студентов высших учебных заведений. – К.: Генеза, 2004. 664 с.
3. Amabilis-Sosa L.E., Vázquez-López M., Rojas J.L.G., Roé-Sosa A., Moeller-Chávez G.E. Efficient bacteria inactivation by ultrasound in municipal wastewater // *Environments*. 2018. № 5 (4). P. 47
4. Никифоров-Никишин А.Л., Горбунов А.В., Никифоров-Никишин Д.Л., Головачева Н.А., Климов В.А. Биологическая безопасность кормов для рыб: Учебник для вузов / Под ред. С.В. Пономарева. – М.: Наука, 2023. 272 с.
5. Белов В.Л., Брежнев Л.Л., Лебедев О.Ю., Горбунов А.В. Мониторинговый контроль некоторых физико-химических параметров водной среды в рыболовной УЗВ при применении гибридной технологии ультразвукового и ультрафиолетового излучения в водоподготовке // *Вестник Московского государственного университета технологий и управления имени К.Г. Разумовского (Первый казачий университет). Серия прикладных научных дисциплин*. 2023. № 2. С. 21-35
6. Проскуренко И.В. Замкнутые рыболовные установки. – М.: ВНИРО. 2003. 152 с.
7. Леонов А.В., Зобкова М.В. Общая характеристика развития БПК в длительных экспериментах с водой из разнотипных водных объектов Карелии [статья] / *Труды Карельского научного центра РАН* № 3. 2019. С. 61–79 URL: www.journals.krc.karelia.ru/Download/952-7792-2-PB.pdf (Дата обращения 20.09.2024) <https://doi.org/10.17076/lim952>
8. Перманганатная окисляемость: [текст] / Сайт филиала по пресноводному рыбному хозяйству ГНЦ РФ ФГБНУ «ВНИРО» URL: <https://vniiprh.vniro.ru/announcement/permanganatnaya-okislyaemost-po-2/> (Дата обращения 20.09.2024)
9. Показатели качества воды прудовых хозяйств и требования, предъявляемые к ним: [текст] / *Материалы раздела «Гидрология»* // Сайт учебного центра «ЭВО» URL: <https://gidrologia.ru/publikatsii/pokazateli-kachestva-vody-prudovykh-hozyaystv-i-trebovaniya-predyavlyaemye-k-nim.html> (Дата обращения 20.09.2024)
10. Tan W.K., Cheah S.C., Parthasarathy S., Rajesh R.P., Pang C.H., Manickam S. Fish pond water treatment using ultrasonic cavitation and advanced oxidation processes // *Chemosphere*. 2021. 274, 129702.
11. Ультразвук в водоподготовке: [статья] / *Журнал «Аква-Терм»*. // *Водоснабжение и водоподготовка* №6 (88), 2015. URL: https://aqua-therm.ru/articles/articles_379.html (Дата обращения 20.09.2024)
12. Живая вода: пять прогрессивных технологий очистки: [статья] / *Изд. РБК-тренды. Экономика*, 2021. URL <https://trends.rbc.ru/trends/green/60ab81379a79477ea76540b5?from=copy> (Дата обращения 20.09.2024)

LITERATURE AND SOURCES

1. Gorbunov A.V., Nikiforov-Nikishin D.L., Kalita T.L., Ponomarev A.K. (2022). Technologies of organic aquaculture: Textbook for universities / Edited by S.V. Ponomarev. Moscow: Nauka. 431 p. (In Russ.)
2. Romanenko V.D. (2004). Fundamentals of hydroecology: a textbook for students of higher educational institutions. Moscow: Geneza. 664 p. (In Russ.).
3. Amabilis-Sosa L.E., Vázquez-López M., Rojas J.L.G., Roé-Sosa A., Moeller-Chávez G.E. (2018). Efficient bacteria inactivation by ultrasound in municipal wastewater // *Environments*. № 5 (4). P. 47.
4. Nikiforov-Nikishin A.L., Gorbunov A.V., Nikiforov-Nikishin D.L., Golovacheva N.A., Klimov V.A. (2023). Biological safety of fish feed: Textbook for universities / Edited by S.V. Ponomarev, Moscow: Nauka Publ. 272 p. (In Russ.).
5. Belov V.L., Brezhnev L.L., Lebedev O.Yu., Gorbunov A.V. (2023). Monitoring control of some physico-chemical parameters of the aquatic environment in fish farming with the use of hybrid technology of ultrasonic and ultraviolet radiation in water treatment // *Bulletin of the Moscow State University of Technology and Management named after K.G. Razumovsky (First Cossack University). Series of Applied scientific disciplines*. No. 2. Pp. 21-35. (In Russ.).
6. Proskurenko I.V. (2003). Closed fish-breeding installations. Moscow: VNIRO. 152 p. (In Russ.).
7. Leonov A.V., Zobkova M.V. (2019). General characteristics of BOD development in long-term experiments with water from diverse water bodies in Karelia [article] / *Proceedings of the Karelian Scientific Center of the Russian Academy of Sciences* No. 3. Pp. 61-79 URL: www.journals.krc.karelia.ru/Download/952-7792-2-PB.pdf (Accessed 09/20/2024) <https://doi.org/10.17076/lim952>. (In Russ.).
8. Permanganate oxidizability: [text] / Website of the Branch for Freshwater Fisheries of the SSC RF VNIRO Federal State Budgetary Scientific Institution URL: <https://vniiprh.vniro.ru/announcement/permanganatnaya-okislyaemost-po-2/> (Accessed 09/20/2024). (In Russ.).
9. Water quality indicators of pond farms and the requirements for them: [text] / *Materials of the section “Hydrology”* // Website of the EVO training center URL: <https://gidrologia.ru/publikatsii/pokazateli-kachestva-vody-prudovykh-hozyaystv-i-trebovaniya-predyavlyaemye-k-nim.html> (Accessed 09/20/2024). (In Russ.).
10. Tan W.K., Cheah S.C., Parthasarathy S., Rajesh R.P., Pang C.H., Manickam S. (2021). Fish pond water treatment using ultrasonic cavitation and advanced oxidation processes // *Chemosphere*. 274, 129702. (In Russ.).
11. Ultrasound in water treatment: [article] / *Journal “Aqua-Term”*. // *Water supply and water treatment* No.6 (88), 2015. URL: https://aqua-therm.ru/articles/articles_379.html (Accessed 09/20/2024). (In Russ.).
12. Living water: five progressive purification technologies: [article] / *Ed. RBC-trends. Economy*, 2021. URL <https://trends.rbc.ru/trends/green/60ab81379a79477ea76540b5?from=copy> (Accessed 09/20/2024). (In Russ.).

Материал поступил в редакцию/ Received 10.01.2024

Принят к публикации / Accepted for publication 15.01.2024