19. Przystupski D., Ussovich M. Spectrum of cellular bioeffects caused by ultrasonic radiation // International Journal of Molecular Sciences. – 2022. – vol. 23. – no. 19. – P. 11222. <https://doi.org/10.3390/ijms231911222>.
20. Rahman, S. M., Strüssmann, C.A., Suzuki, T., Majhi, S.K., Hattori, R.S., Md. Alam, A. (2017). Effects of ultrasound on permeation of cryoprotectants into Japa-nese whiting Sillago japonica. Cryobiology, Pages 19–24. <https://doi.org/10.1016/j.cryobiol.2017.06.003>.
21. Tan, W.K., Chia, S. K., Parthasarathy, S., Rajesh, R.P., Pang, K.H., & Man-ickam, S. (2021). Water purification in fish ponds using ultrasonic cavitation and advanced oxidation processes. Chemosphere, 274, 129702. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.129702>.
22. Teher D, Milla S. and Banas D. Evaluation of the sublethal effect of a low-power and dual-frequency anti-cyanobacterial ultrasound device on common carp (Cyprinus carpio): a field study. Pollution Solution 24, 5669–5678 (2017). <https://doi.org/10.1007/s11356-016-8305-6>.

УДК 619:615.837:597:577

ТЕХНОЛОГИЯ ПОЛУЧЕНИЯ БЕЗОПАСНОЙ АКВАКУЛЬТУРЫ В УСТАНОВКАХ ЗАМКНУТОГО ВОДОСНАБЖЕНИЯ (ОБЗОР)

Л. В. Бунеева¹, О. Н. Воронис², О. А. Сапожкова¹, И. Д. Шелякин¹

¹ – Воронежский государственный аграрный университет имени императора Петра I

г. Воронеж, Российская Федерация (Российская Федерация,
г. Воронеж, ул. Мичурина, д. 1; e-mail: buneeval@mail.ru);

² – УО «Гродненский государственный аграрный университет»
г. Гродно, Республика Беларусь (Республика Беларусь, 230008,
г. Гродно, ул. Терешковой, 28; e-mail: ggau@ggau.by)

Ключевые слова: ультразвуковое оборудование, профилактика протозойных и инфекционных болезней, рыба, африканский сом.

Аннотация. Использование ультразвуковых технологий является перспективным, при правильном встраивании в технологический процесс выращивания рыбы и гидробионтов позволит обеспечить профилактический эффект при протозойных и инфекционных болезнях биологических водных объектов в условиях промышленного производства рыбы.

TECHNOLOGY FOR SAFE AQUACULTURE PRODUCTION IN CLOSED-LOOP WATER SUPPLY PLANTS (OVERVIEW)

L. V. Buneeva¹, O. N. Voronis², O. A. Sapozhkova¹, I. D. Shelyakin¹

¹ – Voronezh State Agrarian University named after Emperor Peter the Great Voronezh, Russia (e-mail: buneeval@mail.ru);

² – EI «Grodno state agrarian university»

Grodno, Republic of Belarus (Republic of Belarus, 230008, Grodno, 28 Tereshkova st.; e-mail: ggau@ggau.by)

Key words: *ultrasound equipment, prevention of protozoal and infectious diseases, fish, African catfish.*

Summary. *The use of ultrasound technologies is promising, if properly integrated into the technological process of growing fish and aquatic organisms, it will ensure a preventive effect in protozoal and infectious diseases of biological water bodies in the conditions of industrial fish production.*

(Поступила в редакцию 17.06.2024 г.)

Рыбоводство стало неотъемлемой частью пищевой промышленности, обеспечивая миллионы людей во всем мире важным источником белка. Тем не менее рыбоводы сталкиваются с рядом проблем: 1) протозойные и инфекционные болезни; 2) отрицательное влияние отработанной воды на окружающую среду [1]. Использование установок замкнутого водоснабжения позволяют использовать воду многократно, тем самым минимизируя негативное влияние на окружающую среду, параллельно возникает вопрос эффективной очистки оборотной воды [3, 19, 23, 24, 25]. Выполнение зоогигиенических требований к качеству воды как среды обитания является необходимым условием роста и развития рыбы, а также других гидробионтов. Увеличение продуктивности, повышение резистентности к заболеваниям инфекционно-инвазионной природы, усовершенствование методов очистки воды, улучшение качества кормов – это направления для научных изысканий в рыбоводстве [6, 7], контроль над физическими параметрами и своевременное улучшение в автоматическом режиме без участия человека позволят существенно снизить затраты, что повлечет снижение себестоимости продукции [15, 16, 17]. Контроль над физиологическим состоянием рыбы, качеством воды, соблюдение экологического благополучия – условия биобезопасности получаемой продукции [3, 18, 20].

Благополучие любых сельскохозяйственных животных является и этической проблемой при выращивании рыбы и других гидробионтов. Минимизация стресса в рыбоводстве включает в себя обеспечение достаточного пространства, чистой воды и подходящего кормления. При выращивании осетровых, тилапии, африканских сомов в установках

замкнутого водоснабжения рыбоводами часто используются растворы поваренной соли для лечения рыбы при обнаружении паразитических инфузорий, бронхиомикоза и сапролегниоза. Поваренная соль не оказывает отрицательного действия на биофильтр, но при использовании в цикле очистки воды фитофильтров, например, Эйхорнии толстоножкой (*Eichhorniacrassipes*), приведет к гибели данного растения. Исходя из вышеперечисленного, использование ультразвукового оборудования как по отдельности, так и в комбинации с другими системами очистки в технологическом цикле замкнутых систем водоснабжения, основанного на физических эффектах обеззараживания воды, целесообразно [5].

Ультразвуковое оборудование стало ценным инструментом в сельском хозяйстве и производстве благодаря широкому спектру применения [14]. Ультразвуковое оборудование находит разнообразное применение как в промышленности, так и в сельском хозяйстве. Вот некоторые ключевые области применения ультразвуковой технологии: 1) очистка и обеззараживание за счет кавитационных процессов; 2) сварка и соединение, причем ультразвуковая сварка – популярный метод, используемый в таких отраслях, как автомобилестроение, электроника и упаковка, при этом используются высокочастотные вибрации для создания тепла трения, локально плавя соединяемые материалы, обеспечивая быстрое, точное и прочное соединение без необходимости использования дополнительных материалов или клея; 3) экстракция, диспергация и эмульгация активных соединений и ингредиентов в пищевом производстве; 4) неразрушающий контроль и инспекция при производстве и строительстве, что позволяет обнаруживать дефекты, измерять толщину и определять характеристики материалов с помощью высокочастотных звуковых волн; 5) ультразвуковые устройства используются в сельском хозяйстве для отпугивания вредителей, таких как грызуны, птицы и насекомые; 6) орошение и опрыскивание, где ультразвук разбивает жидкости на мелкие капли, что позволяет более эффективно и равномерно вносить пестициды, удобрения и другие растворы, эта технология уменьшает потери жидкости и повышает эффективность использования препаратов. Это лишь несколько примеров применения ультразвукового оборудования в промышленности и сельском хозяйстве.

Универсальность и эффективность ультразвуковой технологии делают ее ценным инструментом в различных отраслях, способствуя повышению производительности, улучшению контроля качества. Поскольку технология продолжает развиваться, вполне вероятно, что ультразвуковое оборудование станет еще более распространенным в сельском хозяйстве и производстве.

Для рыбоводов актуально использовать ультразвуковое оборудование в следующих направлениях:

- 1) применение волн малой интенсивности для эффектов биостимуляции и диагностики;
- 2) применение высокоэнергетических колебаний для эффектов обеззараживания;
- 3) производство кормов (диспергация, эмульгация и экстракция);
- 4) дезинфекция (распыление фунгицидов и дезинфектантов).

Что такое ультразвук и каковы механизмы воздействия ультразвука? Проще говоря, ультразвук – это разновидность высокочастотной звуковой волны, которую мы не можем услышать. Он ведет себя по-разному, когда сталкивается с разными веществами, и эффекты этого поведения применяются в разных производственных сферах. Эти волны имеют частотный диапазон выше слышимого предела человеческого слуха, обычно выше 20 кГц [13].

Уникальным свойства ультразвука основаны на процессе кавитации. Ультразвуковая кавитация – это процесс, возникающий при воздействии высокочастотных звуковых волн на жидкую среду. Звуковые волны создают в жидкости чередующиеся области высокого и низкого давления, что вызывает образование и схлопывание крошечных пузырьков или полостей. Это явление известно, как кавитационные пузыри. Взрыв этих пузырьков создает интенсивные локальные изменения давления и температуры, которые могут вызвать физические и химические изменения в окружающей среде. В неоднородных средах ультразвуковые волны отражаются, преломляются, поглощаются и рассеиваются. Отражение происходит, когда ультразвуковые волны достигают границы между двумя материалами и отражаются обратно. В медицине эффекты отражения используются при диагностике, для создания изображений внутренней структуры. В медицинских целях разные ткани тела имеют разную скорость поглощения, что позволяет дифференцировать структуры и выявлять аномалии. Рассеяние происходит, когда ультразвуковые волны взаимодействуют с мелкими частицами или неровностями среды, в результате чего волны отражаются в различных направлениях.

Существуют ряд других эффектов и реакций, которые изучают с сонохимической (звучохимической) точки зрения. Сонохимия изучает химические реакции и физические изменения, происходящие при воздействии ультразвуковых волн на жидкость или твердое тело, включает использование высокочастотных звуковых волн для инициирования или ускорения химических реакций, а также для изменения физических свойств материалов [11].

Влияние ультразвука на биологические объекты, требует дальнейшего изучения [2].

Исследование воздействия ультразвуковых волн на биологические объекты, в т. ч. в разрезе повреждения клеточных стенок и других клеточных структур организмов, биостимуляция живых клеток ультразвуковыми волнами представляет научный и практический интерес.

Воздействие ультразвуковых волн на биологические объекты зависит от ряда факторов, в т. ч. от частоты, интенсивности, продолжительности и способа воздействия. Ультразвуковые волны высокой частоты могут проникать глубоко в ткани и взаимодействовать с клетками, в то время как ультразвуковые волны низкой частоты могут воздействовать только на поверхность объекта.

Интенсивность ультразвуковых волн измеряется в ваттах на квадратный сантиметр ($\text{Вт}/\text{см}^2$) и определяет количество энергии, передаваемой объекту.

Продолжительность ультразвукового воздействия также играет роль в определении воздействия на биологические объекты. Кратковременное воздействие может не вызвать значительного ущерба, в то время как длительное воздействие может привести к необратимому повреждению. Одним из воздействий ультразвуковых волн на биологические объекты является повреждение клеточных стенок и других клеточных структур. Ультразвуковые волны могут вызывать механическое воздействие на клетки, приводящее к разрыву или деформации клеточных мембран. Это может привести к высвобождению внутриклеточного содержимого и гибели клеток. Ультразвуковые волны также могут разрушать цитоскелет и другие внутренние структуры клеток, что приводит к изменению формы и функции клеток. Однако ультразвуковые волны могут оказывать и биостимулирующее действие на живые клетки. Ультразвуковые волны могут стимулировать рост и пролиферацию клеток, повышать проницаемость клеточных мембран и увеличивать поглощение клетками питательных веществ и лекарств. Ультразвуковые волны также могут вызывать выработку белков теплового шока и других белков реакции на стресс, которые защищают клетки от повреждений.

Таким образом, ультразвуковые волны оказывают существенное воздействие на биологические объекты, включая повреждение клеточных стенок и других клеточных структур организмов и биостимуляцию живых клеток ультразвуковыми волнами.

Воздействие ультразвуковых волн зависит от нескольких факторов, включая частоту, интенсивность, продолжительность и способ применения.

Необходимы дальнейшие исследования, чтобы полностью понять воздействие ультразвуковых волн на биологические объекты и разработать безопасные, эффективные технологии в различных областях. Однако использование ультразвука в рыбоводстве также имеет некоторые ограничения и проблемы. Эффективность ультразвука зависит от нескольких факторов, включая частоту, интенсивность и продолжительность воздействия. Использование ультразвука высокой интенсивности может вызвать стресс и повреждение рыбы, что приведет к снижению темпов роста и увеличению смертности. Поэтому важно оптимизировать параметры ультразвука для каждого способа применения, чтобы обеспечить безопасность и эффективность метода.

В рыбоводстве на сегодняшний день ультразвуковые технологии используются чаще в разрезе мониторинга здоровья рыб: проведение ультразвуковой диагностики пола и стадий зрелости гонад осетровых. Дополнительными возможными вариантами использования ультразвука в рыбоводстве являются:

- 1) обеззараживание воды (комбинированные системы очистки) [4, 5, 12, 21, 22];
- 2) диспергирование в воде веществ [14];
- 3) биостимуляция икры и рыбы [2];
- 4) ультразвуковое распыление [14].

Обеззараживание воды достигается за счет создания высокоинтенсивной кавитации; диспергирование в воде веществ с помощью ультразвука относится к процессу использования высокочастотных звуковых волн для разрушения вещества на более мелкие частицы или капли, достигая улучшения растворимости и биодоступности веществ, а также для создания стабильных эмульсий и суспензий; биостимуляция икры и рыбы достигается влиянием на мембраны живых клеток организма, повышая их проницаемость, что позволяет лучше усваивать питательные вещества и лекарства. Он также может стимулировать рост и регенерацию клеток, а также способствовать заживлению и восстановлению тканей (режим дозирования в физиотерапии $0,05-1 \text{ Вт/см}^2$, реже до $2-3 \text{ Вт/см}^2$ [2], при интенсивностях ниже $0,05 \text{ Вт/см}^2$ ультразвук практически не оказывает регистрируемого биологического действия, а при интенсивностях, превышающих 1 Вт/см^2 , может вызвать нежелательные эффекты, такие как подавление физиологических функций, перегрев тканей, деструкцию клеток и клеточных органелл); ультразвуковое распыление веществ является следствием разбивания жидкости на мельчайшие капельки высокочастотными волнами (производство аэрозоля и есть создание взвеси мельчайших частиц в газовой среде).

Сельскохозяйственные предприятия, специализирующиеся на разведении и выращивании рыбы в установках замкнутого водоснабжения, все положительные эффекты ультразвука могут применить для достижения следующих эффектов:

1) для стимуляции роста личинки, малька рыбы с целью улучшения роста с определенными интервалами и мощностью ультразвука (маломощные источники, эффект биостимуляции);

2) для обеззараживания оборотной воды, выходящей от рыбы (мощные источники, эффект кавитации), хорошо сочетать с процессом озонирования;

3) для обеззараживания воды при подаче к рыбе, особенно если в цикле очистки используются гидрофиты в качестве фитофильтров с последующей микробиологической очисткой (мощные источники, эффект кавитации), перед поступлением в бассейн с рыбой после кавитационного эффекта воду необходимо подвергнуть аэрации, т. к. любая рыба, выращиваемая в установках замкнутого водоснабжения, требовательна к содержанию кислорода в воде, даже такой неприхотливый вид, как африканский (клариевый) сом (*Clarias gariepinus*), который резистентен к сниженным концентрациям кислорода, при посадке большой плотности будет испытывать стресс, нарастающая гипоксия снизит скорость роста рыбы, а критическая нехватка кислорода приведет к гибели. Достижение эффекта обеззараживания воды при водоподготовке получаем стационарными мощными источниками (промышленные установки), которые монтируем непосредственно на водоводы, биостимуляционные эффекты достигаем погружными маломощными источниками [7, 8, 9, 10].

Следовательно, рыбоводам интересно предлагать сразу ультразвуковое оборудование для обеззараживания, биостимуляции, диспергации и ультразвукового распыления препаратов (фунгицидов и дезинфицирующих средств) внутри помещений фермы для поддержания зоогигиенических требований к содержанию животных и минимизации вреда, наносимого сельскохозяйственными предприятиями окружающей среде.

Таким образом, использование ультразвуковых технологий является перспективным, при правильном встраивании в технологический процесс выращивания рыбы и гидробионтов позволит обеспечить профилактический эффект при протозойных и инфекционных болезнях биологических водных объектов в условиях промышленного производства и получать качественные и безопасные продукты питания для людей.

ЛИТЕРАТУРА

1. Аквакультура: мировой и российский рынок / А. В. Алпатов [и др.] // Экономика, труд, управление в сельском хозяйстве. – 2020. – № 11(68). – С. 131-139. – DOI 10.33938/2011-131. – EDN VYAKUF.
2. Акопян, В. Б. Ультразвук в медицине, ветеринарии и биологии : учеб. пособие для бакалавриата и магистратуры / В. Б. Акопян, Ю. А. Ершов; ред. С. И. Щукин – 2-е изд., испр. и доп. – М.: Юрайт, 2016. – 222 с.: ил. – (Университеты России). – Библиогр. в конце гл. – ISBN 978-5-9916-7113-2.
3. Астахова, С. А. Обеззараживание воды высокочастотным ультразвуком / С. А. Астахова // Вестник ВСГУТУ. – 2013. – № 4(43). – С. 164-167. – EDN RBEDIL.
4. Ахмедова, О. О. Анализ методов очистки сточных вод для использования в установках оборотного водоснабжения / О. О. Ахмедова, М. В. Панасенко // Инновационные технологии в обучении и производстве: Материалы XVII Всероссийской заочной научно-практической конференции. В 3-х томах, Камышин, 23-25 ноября 2022 года. Том 1. – Волгоград: Волгоградский государственный технический университет, 2022. – С. 35-38. – EDN FUYYAK.
5. Водоподготовка: Справочник. / Под ред. д.т.н., действительного члена Академии промышленной экологии С. Е. Беликова. – М.: Аква-Терм, 2007. – 240 с.
6. Гаврилов, Ю. С. Инновационные технологии обеззараживания воды в едином «светозвуковом» поле / Ю. С. Гаврилов, Е. В. Сыцянюк // Энергетика и энергосбережение: теория и практика : Сборник материалов IV Всероссийской научно-практической конференции: электронный сборник, Кемерово, 19-21 декабря 2018 года / Под редакцией В. Г. Каширских, И. А. Лобур. – Кемерово: Кузбасский государственный технический университет имени Т. Ф. Горбачева, 2018. – С. 114.1-114.5. – EDN YWOBWX.
7. Джакупова, И. Б. Биологический метод очистки сточных вод / И. Б. Джакупова, Г. С. Султангазиева, А. Ж. Божбанов // XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс. – 2014. – № 1(17). – С. 113-117. – EDN SCEILB.
8. Ефремова, М. Е. Анализ очистки сточных вод с помощью эйхорнии / М. Е. Ефремова // 23 января 2023 года, 2023. – С. 93-96. – EDN VTTYUO.
9. Исследование нетрадиционных способов очистки промышленных сточных вод / Т. А. Финоченко [и др.] // Инженерный вестник Дона. – 2019. – № 8(59). – С. 42. – EDN OPDQWD.
10. Павленко, А. А. Применение очистки воды и доочистки сточных вод с помощью культуры эйхорнии на примере Воронежской области / А. А. Павленко, Е. А. Маслихова, В. Д. Галкин // Системы жизнеобеспечения и управления в чрезвычайных ситуациях: Межвузовский сборник научных трудов. – Воронеж: Воронежский государственный технический университет, 2014. – С. 58-63. – EDN WEDDNM.
11. Сонохимические методы в пищевой промышленности / С. А. Уласевич [и др.]; Санкт-Петербург, учебно-методическое пособие, 2020.
12. Ультразвуковые технологии и оборудование для интенсификации процессов / В. Н. Хмелев [и др.] // Технологии и оборудование химической, биотехнологической и пищевой промышленности: материалы VIII Всероссийской научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых с международным участием, Бийск, 20-22 мая 2015 года / ФГБОУ ВПО «Алтайский государственный технический университет им. И. И. Ползунова», Бийский технологический институт (филиал). – Бийск: Бийский технологический институт (филиал) федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Алтайский государственный технический университет им. И. И. Ползунова», 2015. – С. 11-20. – EDN UYPPKZ.
13. Флинн, Г. Физика акустической кавитации в жидкостях / Г. Флинн // Физическая акустика / Под ред. У. Мезона. – М.: Мир, 1967 – Т. 1, Ч. Б. – С. 7-138.

14. Применение ультразвука высокой интенсивности в промышленности / В. Н. Хмелев [и др.]; Алт. гос. техн. ун-т, БТИ. – Бийск: Изд-во Алт. гос. техн. ун-та, 2010. – 203с. ISBN 978-5-9257-0187-41.
15. Abd El-Haq M. E. et al. Inhibition of microbial pathogens in farmed fish // *Marine Pollution Bulletin*. – 2022. – Т. 183. – P. 114003. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2022.114003>.
16. Chong K. M. et al. Microbes and fish diseases // *Latest achievements of microbiological technologies in aquaculture*. – Academic Press, 2023. – pp. 65-102. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-90261-8.00009-2>.
17. Duan B. et al. Mechanism and application of ultrasound-enhanced bacteriostasis // *Journal of Cleaner Production*. – 2021. – Т. 290. – P. 125750. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.125750>.
18. Fetyan N. A. Kh., Salem Attiya T. M. Water purification using ultrasonic waves: application and problems // *Arabic Journal of Fundamental and Applied Sciences*. – 2020. – Т. 27. – No. 1. – pp. 194-207. <https://doi.org/10.1080/25765299.2020.1762294>.
19. Kasper S. et al. Aquatic environment and life support systems // *Fundamentals of aquatic veterinary medicine*. – 2022.
20. Latha, K. Jenifa and Sankriti, Ramanarayan and David, Arokhiaraj and Shrivel, R., IoT Based Water Purification Process Using Ultrasonic Water Sound Waves (2020). Test Development and Management, Mattingley Publishing Co., Inc. ISSN: 0193-4120. 82(1)11115 – 11122, 2020, Available on SSRN: <https://ssrn.com/abstract=3557318>.
21. Nam Kung H. Water purification in aquaculture recirculation systems (RAS) using ultrasound-induced cavitation: dis. – Dissertation, Kiel, Christian-Albrechts-Universität zu Kiel, 2020, 2020.
22. Ni G. et al. Mechanical stirring-accelerated ultrasonic treatment for wastewater treatment: sustainable formation of hydroxyl radicals // *Water Research*. – 2021. – p. 198.– p. 117124. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2021.117124>.
23. Ricart S., Rico A. M. Assessing technical and social driving factors of water reuse in agriculture: A review on risks, regulation and the yuck factor // *Agricultural Water Management*. – 2019. – Т. 217. – С. 426-439. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2019.03.017>.
24. Stępniaк L., Stańczyk-Mazanek E. Ultrasonic energy as a means of promoting water purification during the coagulation process // *Energy*. – 2022. – Т. 15. – No. 14. – P. 5186. <https://doi.org/10.3390/en15145186>.
25. Y. Peng et al. Characteristics of Ultrasonic Enhanced Drinking Water Treatment Process for Algae Removal // *Journal of Water Process Engineering*. – 2023. – Т. 55. – P. 104154. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2023.104154>.