

## КЛЮЧЕВЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ СИСТЕМНЫХ ПРЕОБРАЗОВАНИЙ ПРОИЗВОДСТВА АКВАКУЛЬТУРЫ С ПРИМЕНЕНИЕМ ТЕХНОЛОГИЙ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА

<sup>1</sup>Ронжин А.Л., <sup>1</sup>Савельев А.И., <sup>1</sup>Крестовников К.Д.

Санкт-Петербургский Федеральный исследовательский центр Российской академии наук,  
г. Санкт-Петербург, Российская Федерация

**Аннотация.** Потребность в качественной рыбной продукции и необходимость снижения антропогенной нагрузки в процессе производства на экологию требуют поиска компромиссных решений и привлечения современных технологий искусственного интеллекта, машинного обучения для автоматизации, цифровизации и роботизации производства аквакультуры, в том числе в установках замкнутого водоснабжения. В статье сформулированы ключевые научные и организационно-технологические направления системных преобразований производства аквакультуры на основе междисциплинарных исследований, комплексирования агропромышленных производств, популяризации науки и продвижения развлекательно-образовательных услуг. Приводится описание разработанных средств комплексной автоматизации управления сенсорными и активационными устройствами. Рассмотрен опыт их применения в системах аэропоники и варианты их внедрения в системах производства аквакультуры.

**Ключевые слова.** Аквакультура, установки замкнутого водоснабжения, контроллеры, автоматизация, анализ изображений, сенсорные системы, проактивное управление.

## KEY DIRECTIONS OF SYSTEM TRANSFORMATIONS IN AQUACULTURE PRODUCTION USING ARTIFICIAL INTELLIGENCE TECHNOLOGIES

<sup>1</sup>Ronzhin A.L., <sup>1</sup>Savelyev A.I., <sup>1</sup>Krestovnikov K.D.

St. Petersburg Federal Research Center of the Russian Academy of Sciences,  
St. Petersburg, Russian Federation

**Abstract.** The need for high-quality fish products and the need to reduce the anthropogenic load on the environment in the production process require the search for compromise solutions and the use of modern artificial intelligence technologies, machine learning for automation, digitalization and robotization of aquaculture production, including in closed water supply installations. The paper provides the key scientific, organizational and technological directions of systemic transformations of aquaculture production on the basis of interdisciplinary research, the integration of agro-industrial industries, the popularization of science and the promotion of entertainment and educational services for residents of megacities. A description of the developed means of complex automation of the functioning of sensor and activation devices is given. The experience of their application in aeroponics systems and options for their implementation in aquaculture production systems are considered.

**Keywords.** Aquaculture, recirculating water installations, controllers, automation, image analysis, sensor systems, proactive control.

Эффективность производства аквакультуры в установках замкнутого водоснабжения (УЗВ) в полной мере зависит от качества мониторинга многочисленных физических, химических и биологических параметров и оперативного вмешательства в технологический процесс, в том числе специалистов ветеринаров. При проектировании подобного производства следует учесть аспекты негативного влияния на окружающую среду. Остатки несъеденных кормов, продукты метаболизма от выращиваемых гидробионтов, оседая на дне приводят к активному развитию фито-, зоо- планктона и бентоса, потребляющему кислород, и созданию безжизненных зон с высоким содержанием углекислого газа [1]. Одним из способов снижения негативного воздействия является применение биогенных кормовых добавок, в том числе повышающих резистентность рыбы к заболеваниям [2]. Кроме того, не соблюдение кислородного, температурного режимов, некачественные корма являются стрессовыми факторами для рыбы и ведут к развитию инфекционных процессов и нарушениям санитарно-гигиенического режима акватории. Для открытых водоемов практикуется использовать поликультуры для минимизации заражения рыб диплостомозом, постодиплостомозом [3].

Отходы от производства в виде водных растворов и сухих смесей, содержащих азот и фосфор, могут быть использованы в других видах сельскохозяйственного производства. В этом смысле представляет интерес совместного использования УЗВ с выращиванием водорослей и других растений в системах гидропоники или аэропоники. Вопросы совместного выращивания аквакультуры и сельскохозяйственных растений рассмотрены в работе [4], где экспериментальным путем доказан положительный эффект от добавления бактериального штамма в жидкость для опрыскивания растений, в избытке содержащей азот в результате жизнедеятельности рыб. В рамках единой агропромышленной производственной системы, риски создания которой оценивались в работе [5], одновременно планировалось реализовать комплекс по производству топливных пеллет, удобрений из золы, рыбы, кормов, пищевой продукции, глубокой переработке рыбы, а также системы автоматизации инженерных сетей. Также при стратегическом планировании имеет смысл предусмотреть возможность масштабирования производства и создания ситуационного центра управления территориально распределенными УЗВ.

Учитывая колоссальный объем новых междисциплинарных направлений, возникающих на стыке рыбоводства, цифровизации и роботизации, перспективным является создание научно-образовательного центра, проводящего фундаментальные и прикладные исследования, а также обучение специалистов в области рыбоводства. Популяризация научных исследований также будет востребована при создании рекреационных центров аквакультуры, в частности это будет актуально на экологически чистых территориях, примыкающих к мегаполисам. Институциональные, экономические и маркетинговые меры поддержки развития аквакультуры в регионах реализуются за счет введения государственных программ, определяющих плановые объемы федеральных и региональных средств на развитие аквакультуры, создания некоммерческих организаций, защищающих интересы производителей и содействующие реализации государственных программ и внесению предложений по изменению действующего законодательства, продвижения продукции, повышения спроса населения и поиска инвесторов для расширения действующего производства аквакультуры [6].

Рассмотрим основные направления научных исследований, касающихся автоматизации технологических процессов и прежде всего мониторинга и проактивного управления параметрами УЗВ. В настоящее время на УЗВ ежедневно проводится визуальный контроль поведения рыб, визуальный контроль качества воды и других параметров путем привлечения специалистов. Это существенно увеличивает себестоимость производства аквакультуры и не исключает человеческий фактор. В работе [7] рассматривается оптимизация алгоритма биотехнического процесса на основе методов машинного зрения для повышения эффективности процесса кормления гидробионтов в установках замкнутого водоснабжения и открытых садках аквакультуры. Основное внимание уделяется выбору оптических датчиков и влиянию их характеристик на качество съемки в водной среде. Анализ характеристик гидродинамических и термодинамических процессов, протекающих в установках замкнутого водоснабжения проводится в работе [8]. За счет применения имитационного и физического моделирования изменения температуры планируется оптимизировать технологические процессы, увеличивая продуктивность бассейнов и сокращая расходы на производство гидробионтов. Временные, температурные, пространственные параметры гидробионтов и их положения оцениваются на основе физического моделирования акустических и гидроакустических волн, отражающихся от гидробионтов в работе [9]. В морских и пресноводных акваториях также применяются телеметрические биоэлектронные станции на основе двустворчатых моллюсков для оперативного экологического мониторинга прибрежных зон и на фермах аквакультуры [10-11].

Для проектирования системы автоматического распознавания критических ситуаций поведения рыб или понижения качества воды необходимы базы данных с фото и видео материалами, идентифицирующими нормальную ситуацию, а также свидетельствующими о серьезном отклонении от стандартных показателей. Для машинного обучения автоматических систем классификации и распознавания потребуется ручная разметка вышеперечисленных фото и видео материалов. По мере обучения системы привлечение ручного визуального контроля будет постепенно снижаться.

Отечественных систем автоматизации оборудования рыбного хозяйства в настоящее время существует небольшое количество и в основном они предлагают решения частичной автоматизации управления отдельными процессами или устройствами. Один их проектов частичной автоматизации рыбной фермы, представленный в работе [12], описывает основные контролируемые параметры: наличие, уровень, температура воды; кислотность и электропроводность воды, содержание в ней азотных соединений; качество корма. Предлагаемые к разработке решения касаются автоматизации управления систем водоподготовки, фильтрации, отопления, в том числе регулирование скорости вращения барабанного фильтра; запорных устройств водо-, газоснабжения, работы нагнетателя воды, мощности котлов.

Исследования лаборатории автономных робототехнических систем и лаборатории технологий больших данных социкиберфизических систем СПб ФИЦ РАН направлены на разработку модельно-

алгоритмического и программно-аппаратного обеспечения обработки искусственных и естественных сигналов и образов, необходимых для автоматизации систем человеко-машинного взаимодействия, создания и поддержки роботизированных безлюдных производственных процессов [13-16]. Разработанное ранее оборудование и сопутствующие компоненты комплексной автоматизации были реализованы для управления вертикальными гидропонными и аэропонными фермами (рис. 1), в том числе система светодиодного освещения растений, системы контроля и автоматизации цикла выращивания, сенсорные системы для анализа состояния окружающей среды. В таблице 1 представлено описание разработанных модулей.

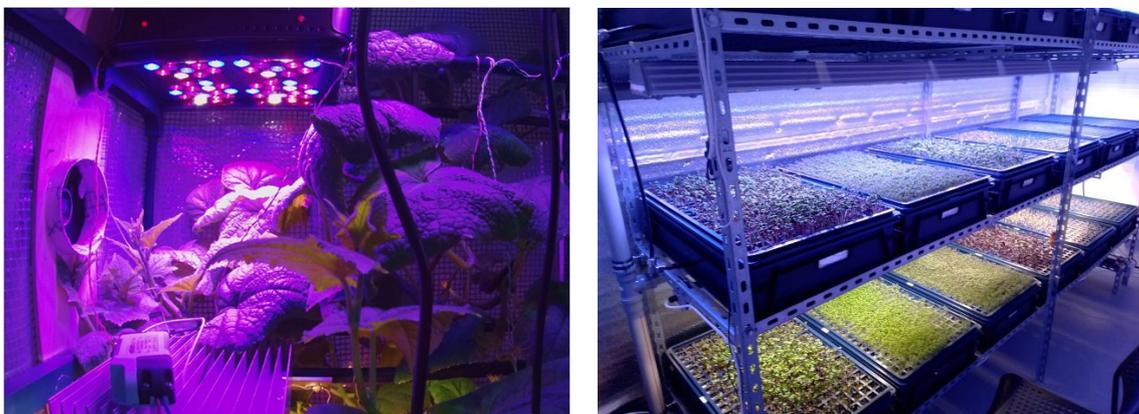


Рисунок 1 – Примеры автоматизации управления вертикальной фермой

Таблица 1 – Описание модулей автоматизации

| Фото модуля   | Наименование модуля                         | Описание характеристик модуля  |
|---|---|--|
|  | Плата управления частотным преобразователем | <ul style="list-style-type: none"> <li>– микроконтроллер STM32 с ARM®-архитектурой 32-bit;</li> <li>– интерфейс передачи данных: LORA (беспроводной);</li> <li>– встроенные автономные часы реального времени;</li> <li>– возможность управления скоростью вращения АД во всем диапазоне;</li> <li>– 4 отдельных группы беспотенциальных контактов для управления функциями ПЧ (пуск/остановка двигателя насоса и т.п.);</li> <li>– питание модуля от сети 220 В.</li> </ul> |
|  | Плата управления освещением                 | <ul style="list-style-type: none"> <li>– микроконтроллер STM32 с ARM®-архитектурой 32-bit;</li> <li>– интерфейс передачи данных: LORA (беспроводной);</li> <li>– встроенные автономные часы реального времени;</li> <li>– 12 отдельных каналов управления светимостью светодиодных ламп;</li> <li>– питание модуля от сети 220 В.</li> </ul>   |

|  |                                       |  |
|--|---------------------------------------|--|
|   | <p>Плата контроля уровня доступа</p>  | <ul style="list-style-type: none"> <li>– микроконтроллер STM32 с ARM®-архитектурой 32-bit;</li> <li>– интерфейс передачи данных: LORA (беспроводной);</li> <li>– возможность управления нагрузкой 220В (электромеханические и электромагнитные замки);</li> <li>– считыватель RFID (распознавание карт и меток RFID);</li> <li>– возможность подключения дисплея I2C.</li> </ul>                         |
|   | <p>Плата комбинированного датчика</p> | <ul style="list-style-type: none"> <li>– микроконтроллер STM32 с ARM®-архитектурой 32-bit;</li> <li>– интерфейс передачи данных: LORA (беспроводной);</li> <li>– встроенные автономные часы реального времени;</li> <li>– измерение температуры и влажности воздуха;</li> <li>– питание модуля: 5-15 В;</li> <li>– возможность подключения 3 внешних датчиков с аналоговым выходным сигналом.</li> </ul> |
|  | <p>Модуль управления</p>              | <ul style="list-style-type: none"> <li>– микроконтроллер Esp-wroom-32;</li> <li>– дисплей 128x64 с подсветкой с программируемым выводом информации;</li> <li>– интерфейс передачи данных LORA (беспроводной);</li> <li>– интерфейс передачи данных Wi-fi;</li> <li>– проводной интерфейс USB.</li> </ul>   |

В рамках автоматизации систем производства аквакультуры разработанные модули планируется использовать для оценивания параметров водной и воздушной сред, управления системами освещения, кормления, а также контроля доступа персонала. Обработка параметров функционирования производства аквакультуры и сбор данных в единой системе позволит производить их комплексирование, анализировать причины возникновения критических ситуаций, а самое главное прогнозировать их появление в будущем. Это и есть суть проактивного управления. Также это позволит более оперативно корректировать параметры технологического процесса производства в зависимости от внутренних параметров водной среды, погодных условий окружающей среды, а также от состояния и этапа онтогенеза аквакультуры. Детальная проработка указанных аспектов будет рассмотрена в дальнейших исследованиях.

#### Список использованных источников

1. Гусева Ю.А. Оптимизация кормления - одно из условий получения безопасной рыбной продукции // Рыбоводство и рыбное хозяйство. 2018. № 4 (147). С. 56-63.
2. Тюрин В.Г., Семенов В.Г., Кузнецов А.Ф., Косяев Н.И., Никитин Д.А. Оценка воздействия прудовой аквакультуры на водные ресурсы // Вестник Чувашской ГСХА, 2020. №2. С. 83-89.
3. Нефедова С.А., Коровушкин А.А., Якунин Ю.В. Экологические и рыбоводно-хозяйственные аспекты подращивания личинок черного амура в системах с замкнутым циркулирующим водоснабжением // Вестник РГАТУ, 2020, № 3 (47), С. 32-36.
4. Гридина Т.С., Александрова У.С. Изучение особенностей выращивания объектов аквакультуры в аквапониической установке совместно с растениями и бактериальным штаммом // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Рыбное хозяйство. 2020. № 1. С. 96–102.

5. Кочеваткина Э.Ф., Волчкова Е.Н., Миляева Н.В. Идентификация и оценка рисков инновационно-инвестиционного проекта в сфере аквакультуры // Вестник алтайской академии экономики и права, 2020, № 12, С. 110-119.
6. Михайлов В.М., Яковлев А.Ю. Основные элементы механизма осуществления регионального протекционизма в аквакультуре в российской федерации // Муниципальная академия. 2020. № 3. С. 130-136.
7. Недоступ А.А., Ражев А.О., Хрусталеv Е.И., Молчанова К.А. Обоснование масштабов подобиa оптических величин в установках для выращивания гидробионтов // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Рыбное хозяйство. 2021. № 1. С. 7–13.
8. Недоступ А.А., Ражев А.О., Хрусталеv Е.И., Бедарева О.М. К теории термодинамического подобиa установок замкнутого водоснабжения для выращивания гидробионтов // Научный журнал «Известия КГТУ», 2020, № 57, С. 40-53.
9. Недоступ А.А., Ражев А.О., Хрусталеv Е.И. Обоснование масштабов подобиa акустических величин в установках для выращивания гидробионтов // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Рыбное хозяйство. 2020. № 4. С. 29–36.
10. Гайский В.А., Гайский П.В. Биоэлектронная автоматическая станция для контроля состояния водной среды в аквакультуре // ТРУДЫ ВНИРО. 2021. Том 184. С. 159–168.
11. Холодкевич С.В., Мотрук М.К., Любимцев В.А., Сулопарова О.Н. Сравнительная биоэлектронная диагностика экологического состояния загрязненных акваторий (на примере некоторых протоков дельты Волги) // Формулы Фармации. 2021. Т. 3. № 1. С. 84-91.
12. Григорьев Д.М., Болгова Д.Л. Концептуальный проект частичной автоматизации установки замкнутого водоснабжения для рыбной фермы // International Journal of Open Information Technologies. 2021, vol. 9, no. 8, С. 52-57.
13. Суровцев В.Н., Паюрова Е.Н., Никулина Ю.Н., Шульгин И.К., Лужняк В.Д., Савельев А.И. Освоение цифровых технологий как фактор повышения конкурентоспособности производства органического молока // Молочное и мясное скотоводство. 2021. № 2. С. 3-7.
14. Крестовников К.Д., Ерашов А.А., Быков А.Н. Разработка схемотехнического решения и конструкции емкостной матрицы датчиков давления для применения в робототехнике // Робототехника и техническая кибернетика. 2020. Т. 8. № 4. С. 296-307.
15. Ронжин А.Л., Нго К.Т., Нгуен В.В. Задачи управления обменом физических ресурсов между сельскохозяйственной техникой разной степени роботизации // Известия ЮФУ. Технические науки. 2020, №1. С. 40-51.
16. Крестовников К.Д., Быков А.Н., Ерашов А.А. Масштабируемая архитектура и структура модулей распределенной системы управления процессами промышленных тепличных комплексов // Мехатроника, автоматизация, управление. 2022. 23(1): 433-441.