



МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение
высшего образования
«РОССИЙСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Кафедра геоэкологии, природопользования и экологической
безопасности

ДИПЛОМНАЯ РАБОТА
(Бакалаврская)

На тему Разработки автоматической системы для борьбы с
мшанковым обрастанием в системе технического
водоснабжения

Исполнитель
Руководитель

Самченко Илья Сергеевич
к.б.н., доцент Мухин Иван Андреевич

«К защите допускаю»
Заведующий кафедрой

кандидат биологических наук, доцент
Мухин Иван Андреевич

«29» нояб 2025г.

СОДЕРЖАНИЕ

Содержание	1
Введение.....	3
1 Экологическая опасность мшанкового обрастания в системах технического водоснабжения	5
1.1 Биологические особенности мшанок.....	5
1.2 Процессы формирования биологического обрастания – стадии, сукцессия	16
1.3 Экологические и экономические последствия мшанкового обрастания	20
2 Методы исследования	26
2.1 Функционал устройства	26
2.2 Моделирование прототипа	29
3 Описание установки	36
3.1 Конструктивное решение установки	36
3.2 Параметры видеорегистрации.....	43
3.3 Автоматизированная система управления и программное обеспечение.....	45
3.4 Система передачи данных и обработки информации.....	49
Заключение	55
Использованные источники	57

ВВЕДЕНИЕ

Обеспечение экологической безопасности означает не только создание условий сохранения природной среды, но и ограждение хозяйственных объектов от негативного воздействия окружающей среды.

Атомные электростанции представляют собой масштабные инженерные сооружения. Не только оказывающие значительное влияние на природу, но и формирующие специфические техно-экосистемы. К таким экосистемам относятся водоемы охладители, используемые для функционирования внешнего контура системы охлаждения. В них формируются специфические и устойчивые биологические сообщества, однако эти сообщества создают помехи работе станционного оборудования, в частности, в системе технического водоснабжения. Источником биологического обрастания служат популяции, обитающие в открытых водоемах. Они формируют расселительные стадии, которые затягивает в СТВ, где они прорастают, формируя плотные структуры.

Наиболее опасным видом обрастателей для системы технического водоснабжения является мшанка – это микроскопический колониальный организм, который может образовывать массивные наросты. Они снижают теплообмен и приводят к коррозии труб и износу оборудования. Эти проблемы не только увеличивают эксплуатационные расходы, но и могут привести к критическим ситуациям.

На данный момент в РФ 11 действующих АЭС. Из них по данным из открытых источников 9 подвержены высокому риску развития биопомех, а 2 среднему [Орлова, 2020]. Проблема борьбы с мшанковым обрастанием в настоящее время стоит достаточно остро, но не имеет удовлетворительного решения

Цель настоящей работы – разработать устройство, которое позволит оптимизировать применение биоцидов в борьбе с мшанковым обрастанием на основе оперативного управления дозированием.

Для достижения цели были поставлены следующие **задачи**:

1. Изучить особенности жизненного цикла мшанок;
2. Выявить уязвимые моменты в жизненном цикле мшанки;
3. Разработать систему фиксации наличия статобластов в воде;
4. Разработать программное обеспечение для фиксации и распознавания статобластов мшанки в воде и их подсчета.

Продукт проектирования: прототип установки для контроля мшанкового обрастания в СТВ АЭС.

Новизна работы. Продукт не имеет аналогов в России

Практическая значимость. Результаты работы использованы при разработке проекта «Brío buster» в рамках Акселерационной программы «Росгидромет».

Апробация работы.

Основные положения работы представлены на конференции: «XVIII Ежегодная научная сессия аспирантов и молодых ученых» (ноябрь 2024 года, ВоГУ, Вологда)а также опубликованы в статье: Самченко, И. С. Влияние перекиси водорода на интенсивность аккумуляции органических веществ в системе технического водоснабжения / И. С. Самченко // XVIII Ежегодная научная сессия аспирантов и молодых ученых : материалы Всероссийской научной конференции (с международным участием), Вологда, 25–29 ноября 2024 года. – Вологда: Вологодский государственный университет, 2025. – С. 459–461.

1 ЭКОЛОГИЧЕСКАЯ ОПАСНОСТЬ МШАНКОВОГО ОБРАСТАНИЯ В СИСТЕМАХ ТЕХНИЧЕСКОГО ВОДОСНАБЖЕНИЯ

1.1 Биологические особенности мшанок

Мшанки (представители типа Bryozoa) это микроскопические колониальные беспозвоночные животные, которые широко распространены в водных экосистемах по всему миру. В России мшанки представлены двумя надклассами – покрыторотыми (Phylactolaemata) и голоротыми (Gymnolaemata) [Гонтарь, 2015]. Мшанки могут обитать как в морских, так и в пресноводных водоёмах, встречаясь на различных глубинах – от мелководий до значительных впадин. Мшанок относят к перифитонным организмам. Перифитоном называют население специфического биотопа, формирующегося в водной среде – там, где она встречается с твердыми телами. Прикрепление животного к субстрату может иметь различный экологический смысл – использование его в качестве опоры, фиксации яиц, а также в качестве места для совокупления, питания, отдыха [Vogl, 2003]. Сообщества, образующиеся на границе раздела фаз, характеризуются сложной экологической структурой. Перифитон представляет собой совокупность организмов, часть из которых прикреплена непосредственно к погружённому в воду субстрату, а другая часть свободно перемещается между ними. Он включает разнообразные группы живых существ, такие как морские водоросли, грибы, бактерии, простейшие и другие. В более широком понимании перифитон охватывает не только живые организмы, но и детрит (органические остатки) и карбонат кальция. Этот комплекс встречается практически во всех водных экосистемах, особенно в неглубоких акваториях — озёрах, реках, ручьях, а также может развиваться на искусственных субстратах [Синельщиков, Мухин, 2019].

Основной особенностью мшанок является их колониальный образ жизни. Колонии состоят из множества мелких организмов — зооидов, которые объединены в единое целое и функционируют как один организм. Колонии

мшанок могут принимать различные формы: кустистые, пластинчатые, корковые и даже висячие. Это разнообразие позволяет мшанкам адаптироваться к различным условиям среды и закрепляться на самых разных субстратах, включая скалы, водоросли, корабли и гидротехнические сооружения [Михненко, Толоконникова 2022]. Структура сообществ обрастателей хоть и определяется типом субстрата, но также подвержена действию и других факторов: освещенность, температура, глубина, содержание растворенных газов, взвешенных частиц. Результатом определенного сочетания этих факторов является биотопическая структурированность континуальных субстратов, что влияет на тип первичной колонизации различными организмами. Так, отмечается, что все чаще мшанки начали встречаться на искусственных субстратах, таких как: бетон инженерных сооружений, рыбоводные садки, понтоны и другие бетонные конструкции. В то же время, статистически достоверной избирательности в выборе субстрата видами филактолемат не обнаружено. Преимущественная встречаемость тех или иных видов на определенных субстратах в различных водоемах определяется конкретными условиями - временем существования субстрата, скоростью и направлению течения, стабильностью биотопа [Щербак, 1994].

Каждый зооид имеет экзоскелет, который может быть как хитиновым, так и известковым, обеспечивая защиту и структурную поддержку (рис. 1.1). Размеры зооидов (и даже анцеструл) оказались связаны с типом субстрата, на котором растет колония. Анцеструлла — это одна из расселительных стадий развития мшанок, которая представляет собой одну из форм бесполого размножения. Анцеструллы развиваются из специализированных зооидов, которые отвечают за размножение в колонии мшанок. Эти личинки способны к миграции и колонизации новых субстратов, что позволяет мшанкам расширять ареал своего обитания. Расселительные стадии - специализированные, подвижные личинки, которые в процессе своего развития могут мигрировать по воде, используя активное движение для поиска подходящих мест для

прикрепления. После того как анцеструлла находит подходящее место, она прикрепляется к субстрату, и из неё развивается новая колония мшанок. Это один из способов бесполого размножения, позволяющий мшанкам поддерживать свою численность и расширять ареал обитания [Ягунова, 2006].

В разное время эволюции мшанок цитоскелет приобретал новые функции. В процессе эволюции мшанки адаптировались к изменяющимся условиям окружающей среды формированием срединной оси колонии (*Primorella*, *Clausotrypa*), мезотеки (*Timanodictya*) или пучка осевых зооидов (*Ascopora*), повышающим прочность и фиксацию колоний в пространстве. Всем криптостоматным мшанкам присущ полиморфизм, выраженный в наличии: у *Primorella* – обильных актинотостилей, выполняющих оборонительную функцию; *Clausotrypa* – упорядоченно расположенных тектозооидов (укрепительная функция), отделенных от автозооидов гребнями, и бугорков; *Ascopora* – макроаканто-, пауростилей (для защиты от хищников), тубулей, пор (внутренней связи частей колонии) [Михненко, Толоконникова, 2022]. Развитие аналогичных защитных структур в разных отрядах мшанок очевидно является реакцией на изменения в биосфере различного воздействия, от глобального до локального. С помощью иммуногистохимических методов и конфокальной сканирующей микроскопии был проведён сравнительный анализ организации нервной системы авикуляриев и вибракуляриев у семи видов морских хейлостомных мшанок из шести семейств. Несмотря на значительные различия в форме, размерах и положении гетерозооидов в колониях, их мышечная и нервная системы имеют общий план строения, что предположительно указывает на параллельную эволюцию [Серова, 2023].

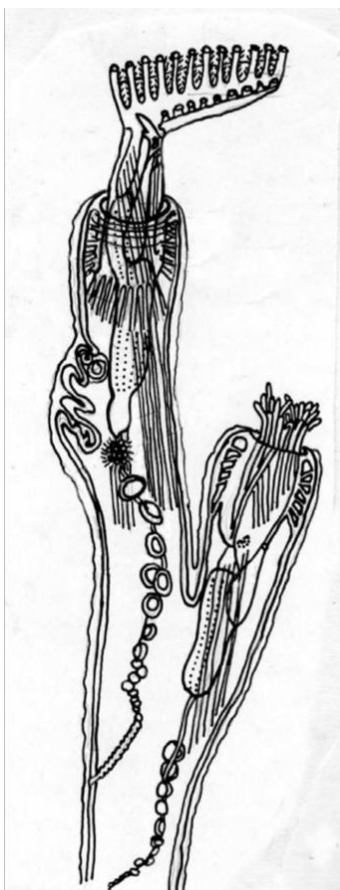


Рисунок 1.1 - Схема строения зооида [Гонтарь, 2013]

Подвижная часть зооида — полипид, основную часть которого представляет собой лофофор и собственно венчик щупалец. Лофофор (основание для щупалец) может принимать разные формы, в зависимости от вида мшанок [Шунькина и др. 2014]. Внутри венчика щупалец находится ротовое отверстие, которое только у филактолемат закрыто эпистосом — языкоподобным образованием, отсюда и название — покрыторотые. Питание осуществляется за счет совокупной активности щупалец лофофора и их ресничек, чье биение создает нисходящий ток воды, благодаря которому частички пищи перемещаются к ротовому отверстию. При отсутствии течения, приносящего свежие порции воды с пищевыми частицами, колонии быстро облавливают окружающий их объем и голодают. Интересно, что в зависимости от отсутствия и наличия течений, лофофоры каждого зооида ведут себя по-разному. Так, известно, что “сканирующая активность”, переkreщивание “рук”

колонии, наклоны отдельно стоящих зооидов и групповые реакции полипидов, представляют собой адаптации к отсутствию течения [Тамберг и др. 2014].

Мшанки активно потребляют бактерии, которые являются важным источником белка и других питательных веществ. Важной составляющей рациона мшанок являются диатомовые водоросли. Они обогащены кремнезёмом и содержат значительное количество питательных веществ, включая липиды и белки. Также мшанки потребляют зелёные водоросли и цианобактерии, которые могут формировать симбиотические отношения с колонией, влияя на её окраску. Хотя мелкие ракообразные и коловратки также могут попадать в поток воды, они нередко избегают поедания мшанкой благодаря активным движениям. Более того, крупные особи могут просто не проходить через щупальцевый фильтр из-за своих размеров [Скальская, 2012].

В отличие от многих других фильтраторов, мшанки избегают потребления детрита. Это связано с особенностями фильтрации и строением ротового аппарата, который лучше приспособлен к улавливанию живых организмов, а не разлагающихся частиц. Из-за прозрачности стенок полипида окраска колонии мшанок может напрямую зависеть от цвета поглощаемой пищи. Например, потребление диатомовых водорослей с жёлто-бурым пигментом придаёт колониям характерный оттенок. Помимо этого, окраска может изменяться в случае симбиоза с бактериями или сине-зелёными водорослями, которые окрашивают ткани в зелёные или коричневатые тона [Тамберг и др., 2014].

Пищеварительный тракт у мшанок петлеобразный. За ротовым отверстием следует глотка, затем пищевод, желудок и тонкая кишка, заканчивающаяся порошицей. От дна желудка отходит тонкий канатик – фуникулюс, на котором образуются статобласты и семенники [Шуныкина и др. 2013]. Яичники и семенники диффузного типа, представлены небольшим скоплением оогониев и сперматогониев и не имеют выводных протоков.

Яичники формируются на брюшной стороне, а семенники, кроме фуникулюса, – на стенке полипида [Серова, 2023].

Жизненный цикл мшанок достаточно сложен. Филактолематы – гермафродиты. На начальной стадии онтогенеза мшанки существуют в виде крошечных «яиц», которые свободно дрейфуют в водной толще. Эта стадия получила название статобласт, он формируется в результате полового размножения. После оседания на твёрдый субстрат расселительная стадия прикрепляется, и начинает активный рост в зооида, который формирует начало колонии [Евсеева, 2020].

Выделяют два основных типа статобластов: прикреплённые (сессобласты) и свободные (фрибласты). Свободные статобласты, в свою очередь, подразделяются на две группы: флотобласты и спинобласты. Сессобласты обычно характеризуются наличием только развитой капсулы. У флотобластов присутствуют как капсула, так и развитое плавательное кольцо. Спинобласты имеют капсулу, плавательное кольцо и дополнительные прикрепительные структуры, такие как шипы или крючки. Плавательное кольцо содержит мелкие ячейки, заполненные газом, что обеспечивает его плавучесть. Наружная поверхность статобластов обладает видоспецифичной тонкой скульптурой, хорошо различимой при использовании электронно-сканирующего микроскопа. Стенки капсулы статобластов состоят из более прочного хитина по сравнению с хитином кутикулы трубок зоариев. Размеры статобластов являются систематическим признаком и включают, например, соотношение длины статобласта к его ширине (L/B) и соотношение полярной ширины плавательного кольца к его латеральной ширине (pol/lat). У некоторых филактолемат наблюдаются различия между дорзальной и вентральной сторонами статобластов. Для мшанок подкласса филактолемат характерна высокая степень колониальной изменчивости, поэтому при их определении предпочтительно использовать как форму колонии, так и строение статобластов, особенно свободных [Золотухин, 2020].

Мшанки являются важным компонентом экосистем, не только очищая воду, но и обеспечивая место для жизни других организмов. Колонии мшанок служат убежищем для различных видов мелких беспозвоночных и микроскопических животных. В прибрежных зонах колонии могут влиять на состав сообщества за счет своей плотной колонизации, создавая укрытия для других организмов. Также важно отметить, что мшанки являются важным звеном в пищевых цепочках, так как они служат пищей для многих морских и пресноводных животных, таких как ракообразные, рыбы и моллюски. Мшанки могут оказывать влияние на структуру водной среды, создавая дополнительные укрытия и изменение мест обитания для других видов. Это взаимодействие может способствовать биологическому разнообразию в экосистемах, в которых мшанки являются эдификатором.

Изучение морских мшанок показало, что размер фуникулярных тел, расположенных между кишечником и выводящим потоком, напрямую связан с количеством симбиотических бактерий, содержащихся в них. Считается, что крупные структуры с высоким числом симбионтов отражают более зрелую стадию развития, тогда как меньшие тела с небольшим количеством бактерий представляют собой ранние этапы формирования. Наличие электронноплотного матрикса в межклеточном пространстве между симбионтами и цитоплазматическими отростками клеток хозяина, а также предполагаемое увеличение размеров фуникулярных тел, может указывать на наличие обмена веществ между мшанкой и её симбионтами, в том числе транспорт питательных веществ к бактериям. Таким образом, фуникулярные тела, вероятно, выполняют роль хранилища, обеспечивающего поддержание жизнедеятельности и размножение симбиотических организмов. Поскольку личинки некоторых видов мшанок уже содержат симбионтов, можно предположить, что заселение происходит через овицеллы — выводковые камеры, куда бактерии попадают, перемещаясь по фуникулярным тяжам [Карагодина и др, 2018].

В водоемах с высоким уровнем органического загрязнения или в местах с измененными условиями мшанки могут играть роль биоиндикаторов, показывая изменения качества воды [Толоконникова, 2023]. Мшанки чувствительны к изменениям в окружающей среде, особенно к колебаниям температуры, солености и качеству воды. Например, изменения в температурном режиме могут оказывать значительное влияние на жизненный цикл мшанок, особенно в умеренных и холодных водах, где колонии подвергаются сезонным колебаниям. Уменьшение солености или загрязнение водоёмов также могут негативно сказаться на их численности и структуре колоний. Экологические изменения, такие как увеличение концентрации питательных веществ или загрязнение химическими веществами, могут приводить к изменению состава сообщества мшанок, что влияет на весь водоем [Гонтарь, 2016].

Температура воды — один из ключевых факторов, определяющих рост, размножение и выживание колоний мшанок. В умеренных широтах именно температурные колебания диктуют жизненный цикл этих организмов. Зимой, при значительном понижении температуры, колонии мшанок обычно гибнут. Однако в тёплое время года они активно развиваются из статобластов. В весенний период, когда вода начинает прогреваться, из перезимовавших статобластов образуются молодые колонии. Наибольшего развития они достигают летом и в начале осени, когда температура воды благоприятна для роста и размножения. При этом образованные в начале лета статобласты могут сразу же развиваться в колонии, если температурные условия остаются стабильными. Позднелетние статобласты, напротив, остаются в покое до следующей весны, перенося зиму в виде прочных, устойчивых к холоду капсул [Старунова и др. 2021]. Таким образом, у большинства мшанок умеренного климата ежегодно формируется два поколения колоний, каждое из которых возникает исключительно из статобластов. После зимнего периода колонии развившиеся из статобластов, довольно быстро приступают к половому

размножению. Этот процесс обычно продолжается три-четыре недели и случается всего один раз в году. В регионах с суровым климатом – например, в северных водоёмах или альпийских озёрах — половое размножение может вовсе не происходить. Это объясняется коротким вегетационным сезоном, который не позволяет мшанкам пройти полный цикл созревания половых продуктов. Производство статобластов у мшанок отличается высокой интенсивностью — колонии способны формировать огромное количество этих покоящихся структур. Так известный английский учёный Браун подсчитал, что колония мшанки *Plumatella repens* на растениях на одном квадратном метре в Douglas lake, Мичиган, США могут производить восемь тысяч статобластов в осенний период. Такая стратегия позволяет переживать даже самые неблагоприятные периоды — как понижение температуры, так и высыхание водоёмов [Гонтарь, 2012].

Соленость воды является одним из ключевых факторов, определяющих видовой состав, распространение и адаптацию мшанок в водоемах. Большинство морских мшанок адаптированы к стабильной океанической солёности, однако некоторые виды могут обитать и в опреснённых зонах, эстуариях и даже в пресной воде. Для пресноводных форм, таких как представители филактолемат, характерна высокая устойчивость к низкой и переменной солёности. При этом внезапные изменения солевого режима (например, в устьевых участках рек или при сбросе сточных вод) могут вызывать стресс у колоний, снижать их жизнеспособность и репродуктивную активность. Морские виды обитают в узком диапазоне солёности и чувствительны к опреснению. В условиях стабильной солёности наблюдается высокая плотность и биомасса колоний, особенно на твёрдых субстратах. Таким образом, солёность определяет географическое распределение мшанок и устойчивость их популяций к антропогенным и климатическим изменениям [Гонтарь, 2013б].

Освещенность водоёма оказывает опосредованное, но значительное влияние на жизнедеятельность мшанок. Хотя сами мшанки не используют солнечный свет напрямую, они зависят от его воздействия на окружающую среду. Свет способствует росту микроводорослей, бактерий и другого фитопланктона, который служит основной пищей для мшанок. Особенно важно это для пресноводных и прибрежных морских видов, обитающих на мелководье. В условиях высокой освещённости активно развиваются перифитонные сообщества, что создаёт благоприятные условия для питания и размножения мшанок. В регионах с выраженной сезонностью освещенности, например в Арктике, развитие колоний приурочено к летним месяцам, когда фотопериод максимален. Низкая освещённость зимой, вызывает спад активности, переход к состоянию покоя и задержку в развитии новых колоний [Гонтарь, 2010]. Солнечность влияет на жизненный цикл мшанок через доступность пищи и общее состояние экосистемы.

Кислород является жизненно необходимым фактором для дыхания мшанок, особенно учитывая их фильтрационный способ питания. Большинство видов обитает в зонах с хорошо аэрированной водой — на мелководье, в местах с проточной водой или в условиях достаточной циркуляции. Недостаток кислорода может резко снижать активность зооидов, угнетать рост колоний и препятствовать процессам полового и бесполого размножения. Особенно чувствительны к дефициту кислорода пресноводные виды филактолемат, обитающие в стоячих водоёмах, где кислород может сезонно снижаться. В таких условиях колонии нередко переходят в стадию покоя. Однако некоторые виды демонстрируют определённую устойчивость и могут выживать в эвтрофных водоёмах, насыщенных органикой, за счёт регуляции метаболизма. Насыщенность воды кислородом определяет как скорость обмена веществ, так и общее состояние мшанок и их способность колонизировать конкретные участки водной среды [Денисенко, 2020].

Течение играет важную роль в жизни мшанок, поскольку обеспечивает постоянный приток воды с пищевыми частицами и кислородом. Благодаря фильтрационному типу питания мшанки зависят от потока, который позволяет эффективно захватывать взвешенные микроорганизмы — бактерии, водоросли, мелкие зоопланктонные организмы. Особенно благоприятны умеренные и устойчивые течения, характерные для рек, эстуариев и прибрежных морских зон. В условиях быстрого течения мшанки выбирают защищённые микросреды, где можно прикрепиться и фильтровать воду без угрозы повреждений. Слишком слабое течение, напротив, затрудняет питание и приводит к загрязнению поверхности колонии оседающими частицами. У некоторых видов строение колонии даже морфологически адаптировано к направлению и силе потока — вытянутая форма, прикрепительные структуры, развитие авикулярий [Лаптев, 2017]. Также сильные течения могут сносить уже прикрепленные колонии мшанок и органические наносы, которые являются важным элементом питания всех видов биообрастателей.

Одной из экологически значимых особенностей мшанок является их способность образовывать биообрастания — плотные колонии, которые могут покрывать различные твердые поверхности. Это явление наблюдается как в морских, так и в пресноводных экосистемах, где мшанки образуют биологические покрытия на субстратах, таких как камни, ракушки, кораллы или искусственные конструкции, такие как корабли и платформы. Биообрастание может иметь как положительные, так и отрицательные экологические последствия. С одной стороны, оно способствует увеличению биоразнообразия, создавая место для других организмов, с другой — может быть причиной забивания водозаборов, труб и других объектов, куда мшанка может попасть из естественного источника [Полтаруха, 2000].

1.2 Процессы формирования биологического обрастания – стадии, сукцессия

Биологическое обрастание — это процесс образования на поверхности твёрдых субстратов различных живых организмов, таких как водоросли, мшанки, моллюски, ракообразные, кораллы и другие микроорганизмы (рис. 1.2). Этот процесс может происходить как в морской, так и в пресной воде, и имеет значительное влияние на экосистемы, а также на деятельность человека.



Рисунок 1.2 Биологическое обрастание [Власов и др., 2021]

Процесс обрастания может быть разделён на несколько стадий, которые представляют собой последовательные этапы заселения поверхности и развития сообществ организмов. На первой стадии поверхности, подвергшиеся обрастанию, заселяются микроскопическими организмами — такими как бактерии, диатомовые водоросли и одноклеточные водоросли. Эти организмы начинают развиваться на чистых, или слегка загрязнённых поверхностях, благодаря чему образуют основу для последующего обрастания.

На этом этапе появляется первичная биоплёнка, состоящая в основном из бактерий и микроскопических водорослей, которая способствует прикреплению других организмов. На следующей стадии начинают расти более крупные водоросли, такие как красные и коричневые водоросли, а также микроорганизмы, такие как мшанки. Эти организмы используют биоплёнку как субстрат для прикрепления и начинают интенсивно развиваться, образуя

первые более сложные сообщества. Мшанки, например, на этом этапе активно начинают заселять поверхности, образуя колонии. Далее на их поверхности начинают развиваться ещё более крупные организмы, такие как моллюски, ракообразные и кораллы. На этом этапе происходит конкуренция между видами за пространство и ресурсы. Крупные организмы могут затенять более мелкие, ограничивая их доступ к свету или пище. Развитие экосистемы на этом этапе становится более сложным, и со временем появляется более стабильная структура сообщества. В зрелых экосистемах возникает динамичное равновесие между различными видами, которые могут сосуществовать на определённой территории. Это устойчивое состояние называется климаксом и характеризуется тем, что виды, составляющие сообщество, достигают оптимального баланса в доступе к ресурсам и не вступают в разрушительную конкуренцию. Этап зрелости может длиться долгое время, до тех пор, пока не произойдут внешние изменения, такие как изменения в климате или загрязнение, которые могут нарушить равновесие и вызвать новое обрастание [Полтаруха, 2000].

Когда экосистема только начинает развиваться, на неё воздействуют внешние факторы, такие как заселение новых видов, вымывание, изменения в температуре и других условиях среды. Структура и разнообразие перифитонных цилиосообществ зависят от сложности и типа субстрата. Исследования показали, что на субстратах с более сложной архитектоникой формируются более разнообразные и устойчивые сообщества [Мухин, 2014б]. Пионерные виды, такие как представители семейства Plumatellidae, быстро прикрепляются к субстрату и образуют первичную зооидную клетку — анцеструллу, являющуюся основой всей колонии. Выбор подходящего субстрата и благоприятные условия окружающей среды (температура воды, освещенность и наличие питательных частиц) играют ключевую роль на этом этапе. После закрепления личинок начинается стадия активного роста колонии за счёт бесполого размножения и образования новых зооидов.

Колония разрастается путём почкования, формируя трубчатые или пластинчатые структуры в зависимости от видовой принадлежности. На этом этапе мшанки вступают в конкуренцию с другими обрастающими организмами — водорослями, диатомовыми и бактериями. Постепенно колония становится более плотной и устойчивой к внешним воздействиям, её структура усложняется. Достигая зрелости, колония формирует сложную пространственную сеть зооидов с высокой плотностью и стабильностью, эффективно используя ресурсы окружающей среды.

В зрелых колониях часто присутствуют разные типы зооидов (например, аутозооиды и гетерозооиды), что позволяет им лучше адаптироваться к изменяющимся условиям. На этом этапе также возможны симбиотические взаимоотношения с водорослями или бактериями. Однако при наступлении неблагоприятных условий (изменение температуры, солёности, загрязнения или конкуренции с другими организмами) колония начинает разрушаться: часть зооидов отмирает, а для переживания неблагоприятного периода формируются статобласты — покоящиеся структуры, способные восстановить колонию после регрессии [Гонтарь, 2002].

Схемы образования биологического обрастания колоний мшанок представляют собой сложные процессы, зависящие от условий среды, типа субстрата и состава сообществ. Одной из основных является линейная сукцессия, при которой заселение поверхности происходит постепенно: сначала формируются пионерные сообщества из бактерий и водорослей, а затем к ним присоединяются более сложные организмы, такие как мшанки и гидроиды. Этот процесс характеризуется поочередным наложением биомассы, когда каждый новый слой частично вытесняет предыдущий, создавая сложные многослойные структуры на субстрате [Vogel, 2003]. Такая сукцессия наиболее типична для стабильных условий, когда изменения среды минимальны и колонии имеют возможность разрастаться и стабилизироваться на протяжении длительного времени.

Другая схема – мозаичная сукцессия – характерна для участков с неоднородной средой или переменными условиями. В этом случае на разных участках одного и того же субстрата могут развиваться колонии на различных стадиях зрелости. Например, на одном краю камня формируются молодые зооиды мшанок, а на другом – плотные зрелые колонии с развитыми структурами. Мозаичная схема обеспечивает устойчивость к воздействию неблагоприятных факторов, поскольку часть колоний всегда остаётся в активной стадии, компенсируя гибель других. Такая схема также демонстрирует высокую пластичность и способность к адаптации в условиях переменного гидрологического режима или механических повреждений [Лукин, 2003].

Помимо линейной и мозаичной схем, важное значение имеет волновая схема сукцессии, которая связана с сезонными изменениями. В период благоприятных условий (например, летом) колонии мшанок активно разрастаются, занимая большие площади субстрата. Зимой или при снижении температуры значительная часть зооидов отмирает, а на их месте остаются покоящиеся формы — статобласты, способные выжить до следующего благоприятного периода. С наступлением весны из статобластов вновь развиваются колонии, восстанавливая популяцию [Денисенко, 2015]. Волновая схема демонстрирует цикличность, характерную для умеренных широт, где сезонные изменения являются определяющим фактором жизненного цикла мшанок.

Иногда наблюдается пульсирующая сукцессия, которая проявляется в быстрой смене фаз роста и гибели колоний под воздействием экстремальных факторов, таких как резкое изменение температуры воды или загрязнение среды. В таких случаях колонии могут гибнуть полностью или частично, однако оставшиеся статобласты или соседние колонии быстро возобновляют обрастание, восстанавливая сообщество в течение короткого времени. Этот тип сукцессии демонстрирует высокую выживаемость благодаря способности

мшанок к быстрому восстановлению из покоящихся форм и к активному расселению личинок на свободные участки [Гонтарь, 2004].

Таким образом, сукцессия колоний мшанок представляет собой динамический процесс с разнообразными схемами формирования и развития, зависящий от природных условий и особенностей самих мшанок. Используя различные стратегии заселения и восстановления, колонии могут эффективно адаптироваться к переменам, сохраняя биоразнообразие и устойчивость сообществ [Лукин, 2003].

Сукцессия мшанковых колоний – динамичный процесс, который может варьироваться в зависимости от условий среды и видовой специфики. На протяжении сукцессии происходят изменения в структуре колонии, её плотности и видовом составе. Эти процессы обеспечивают адаптацию мшанок к различным условиям обитания и позволяют формировать устойчивые обрастания на разнообразных субстратах [Мухин, Болотова, 2013].

1.3 Экологические и экономические последствия мшанкового обрастания

В промышленности вода широко используется на объектах энергетики, в процессе производства цветных и черных металлов, а также в деревообрабатывающих комбинатах. Зачастую она выступает охлаждающей средой или для переноса растворенных веществ. Для этих целей рядом с крупными объектами энергетики находятся водоемы охладители. Так как атомные станции для своих нужд используют воду из открытого источника, то живые организмы попадают в антропогенную среду, в частности в систему технического водоснабжения. Там организмы обрастатели колонизируют всю доступную для жизни поверхность. Крупные колонии в СТВ образуют мшанки [Мухин и др. 2023].

Мшанки — это один из самых распространенных видов обрастателей (рис. 1.3). Из-за большого и постоянного тока свежей воды формируются наиболее подходящие условия для их развития. Скорость роста колониям

добавляет повышенная температура воды. В этих условия мшанки размножаются сразу двумя способами, половым и бесполом. По мере роста колонии её структура усложняется и может формировать объёмные многослойные образования с ветвистой архитектурой. Такие структуры эффективно задерживают как органические, так и неорганические частицы, переносимые водой, способствуя накоплению наноса и формированию системного эффекта. Непрерывная циркуляция воды образует течение воды в трубах, что может выступать и как источник питания и кислорода, и как стрессовый фактор. При этом с ростом скорости течения положительный эффект снижается, а негативный – напротив, увеличивается [Мухин, 2020].

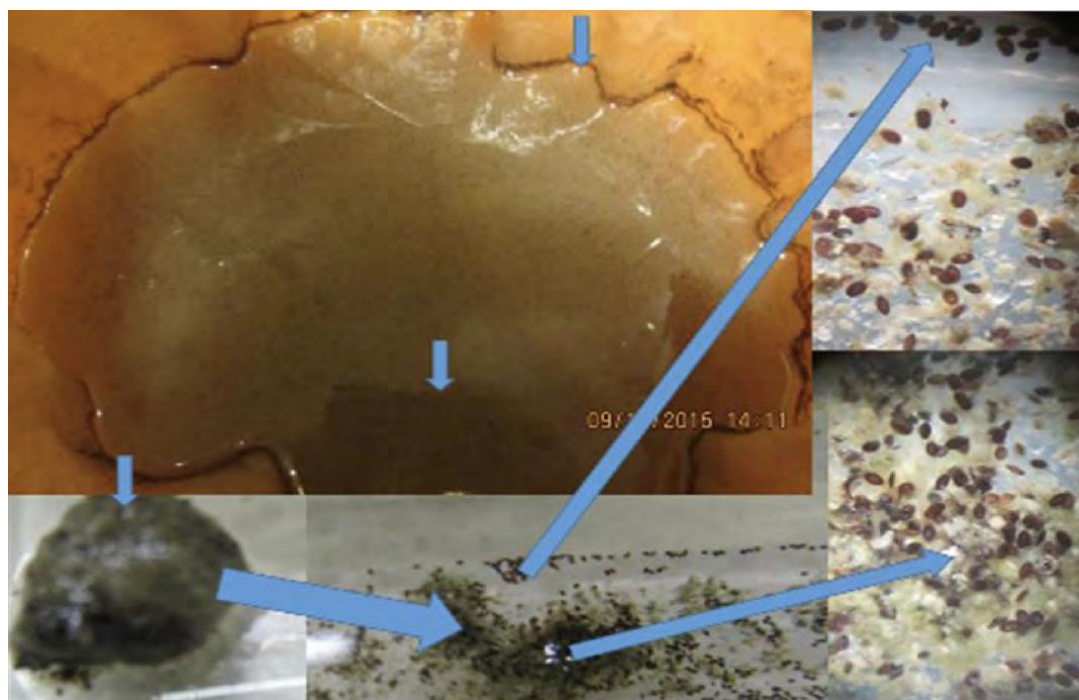


Рисунок 1.3 Результаты обработки проб с поверхностей оборудования внутренних частей СТВ (технический мониторинг, 2014-2016 гг.). Основное содержимое – наносы и обрастание, содержащие фрагменты колоний мшанки и высвобождающиеся из них флотовласты *Plumatella emarginata*, «готовые» к транспортировке с потоками воды [Орлова и др., 2022]

Так как циркуляция воды в системе водоснабжения, а именно в первом, открытом, контуре имеет скорость равной примерно 0,1 м/с, то наросты мшанок не сносит с внутренних поверхностей труб. Все вышеперечисленные условия обеспечивают развитие больших колоний организмов, что приводит к снижению диаметра труб, уменьшению теплообмена и засорению

оборудования. В случае систем технического водоснабжения атомных электростанций такие аварии могут привести к значительным экономическим потерям и возникновению чрезвычайных ситуаций [Горская, 2022]. В некоторых случаях, особенно когда речь идет о технологических инцидентах или нештатных ситуациях на атомных электростанциях, указывается только общая информация без упоминания названия станции или города. Это связано с политикой безопасности и конфиденциальности, особенно в чувствительной отрасли, такой как атомная энергетика, что затрудняет поиск данных по данной тематике.

Одним из наиболее чувствительных элементов ядерной электростанции является теплообменник, который в своей работе зависит от непрерывного циркулирования охлаждающей воды. Если эта вода не успевает охладиться, то может произойти перегрев реактора. Если охлаждающий контур загрязняется биообрастанием, это может привести к значительному снижению эффективности теплообмена, а значит, и к перегреву оборудования. Известны случаи, когда большинство трубок теплообменника были заблокированы отложениями, которые состояли не только из известняка и карбонатов, но и из продуктов коррозии, образующихся под воздействием микробов. Микробная коррозия — это процесс, при котором микроорганизмы, такие как железоокисляющие бактерии, вызывают разрушение металлических конструкций, что дополнительно ухудшает работу системы. Именно поэтому произошел случай в одной из атомных электростанций, где блокировка труб теплообменника в результате биообрастания вызвала необходимость проведения срочных ремонтных работ, что повлекло за собой длительные простои и значительные экономические потери. Это подтверждает, насколько важно внедрение эффективных технологий контроля за биообрастанием, таких как использование антимикробных покрытий или биоцидов в системе охлаждения [Рао и др, 2009].

Проблема биообрастаний актуальна и для систем, использующих для охлаждения морскую воду. Одним из главных вызовов для таких атомных электростанций и других крупных энергоблоков является поддержание нормальной работы теплообменников. Биообрастание, образующееся на трубах и других элементах системы, может значительно снизить эффективность теплообмена, что в свою очередь влияет на производительность станции и её безопасность. На некоторых станциях было зафиксировано, что биообрастание приводило к полному снижению пропускной способности труб, что могло спровоцировать перегрев реактора и даже его отключение. Примером является инцидент на одной из атомных электростанций, когда из-за засора системы охлаждения и заблокированных труб возникли проблемы с поддержанием безопасной температуры реактора, что потребовало немедленного вмешательства специалистов [Сатхати и др, 2010].

На сегодняшний момент АЭС используют ряд методов контроля биообрастания, включая механическую чистку, использование биоцидов и фильтров. Все химические методы основаны на изменении условий среды обитания организмов обрастателей. К таким методам можно отнести использование биоцидов и биопуль. В качестве биоцида могут применяться соединения хлора, брома, меди, перекись водорода, озон и органические биоциды [Мороз и др, 2021]. Однако, такой метод борьбы может приводить к появлению токсичных побочных продуктов, которые оказывают негативное влияние на экосистемы самого водоема охладителя, включенного в водообмен. Именно поэтому важно контролировать дозировки и концентрацию биоцидов. В таких условиях не будут допускаться нарушения природоохранных нормативов.

Одним из наиболее интересных для рассмотрения способов предотвращения развития биообрастаний является организация флотационной защиты. С точки зрения негативного воздействия на водоем охладитель данный вид защиты наиболее оптимален, поскольку нет ввода химических веществ в

экосистему. Метод также не требует большого количества дополнительных затрат. Были проведены исследования на КуАЭС, в ходе которых подсчитали количество личинок дрейссен до применения устройства флотационной защиты и после. В первом случае удалось извлечь в среднем 46% личинок, а во втором около 53% [Минин, Суздалева, 2012]. Данный метод не исследовался на расселительных стадиях мшанок, но является, по нашему мнению, одним из перспективных.

Также в течение длительного времени в лабораторных условиях и в естественной среде тестируются различные противообрастающие покрытия. Данный метод нельзя отнести к безопасным относительно окружающей среды, так как все покрытия неизбежно при контакте с водой будут выделять вредные вещества. При длительной эксплуатации данных покрытий на большой площади высока вероятность превышения предельно допустимых концентраций вредных веществ, что также может привести к наложению штрафов. К одним из новых покрытий можно отнести: покрытия на основе эпоксидной смолы, модифицированной эпоксикаучуком (Э/К) и покрытия на основе силиконалкидной смолы (С/А). Исследования в естественной среде показали примерно одинаковы результаты, но отличия были в видовых составах обрастателей. Следовательно, покрытие должно выбираться в соответствии с видом, против которого ведется борьба. Но это не означает, что через время новый вид обрастателя не займет освободившуюся нишу [Власов и др, 2021].

Также одним из изучаемых методов воздействия на биообрастание является применение ультразвука. На начальных стадиях воздействия наблюдается рост микроперифитона, однако после прохождения пяти месяцев эксперимента в лабораторных и естественных условиях наблюдается изменение плотности обрастаний в меньшую сторону. Данный эксперимент проходил в условиях морской экосистемы и данных насчет изучения пресноводных водоемов не найдено, но результаты лабораторных и естественных испытаний

позволяют рекомендовать продолжение экспериментов на полнофункциональном ультразвуковом устройстве более высокой мощности непосредственно при эксплуатации АЭС [Неврова и др, 2023]. Также необходимо изучать воздействие ультразвука непосредственно на мшанку.

Одной из выдвигаемых теорий на счет способа воздействия на биопомехи в системе технического водоснабжения является применение ультрафиолетового излучения. Данный метод может рассматриваться с целью общей дезинфекции эффективен против бактериально-водорослевой пленки предшественника дрейссенового и мшанкового обрастания. Однако, доказательств непосредственного воздействия на самих мшанок нет. Предполагается, что данный метод является не эффективным. Так как метод очень чувствителен к мутности воды и высокой скорости течения [Егорова и др, 2024]. Как комплекс методов можно рассматривать зарыбление водоема-охладителя видами рыб биомелиораторами. Хотя и воздействие будет осуществляться природными методами, но высокая трудоемкость выращивания рыб, их транспортировки; высокий отход посадочного материала, выращенного в заводских условиях, в местах выпуска, в том числе за счет поедания хищниками. Также к минусам данного метода можно отнести сложность отслеживания его эффективности.

2 МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

2.1 Функционал устройства

После изучения случаев возникновения осложнений в ходе эксплуатации системы охлаждения атомных станций, вызванных образованием биообрастаний, возникла идея разработать устройство, которое с наибольшей эффективностью решала бы эту проблему. Новое решение должно учесть недостатки уже имеющихся схем борьбы и раскрыть положительные стороны каждого приемлемого метода. Так за основу был взят химический метод борьбы. Так как этот метод эффективно уничтожает обрастателей, но не выводит из системы плотно прикрепленный цитоскелет организмов, было решено сконцентрировать внимание именно на расселительной стадии. Эти стадии у организмов обрастателей, в частности мшанки, попадают в циркуляционную систему из водоема охладителя преимущественно находясь непосредственно на водной поверхности. Следовательно прибор должен находиться у места водозабора и располагаться у поверхности. Для этой цели будут использоваться поплавки. Устройство должно не менять своего расположения с течением времени и находится у места водозабора с этой целью в его оснащение был внедрен якорь.

Чтобы фиксировать проплывающие статобласты к корпусу устройства была добавлена видеокамера, которая в режиме реального времени отслеживает их поток. Чтобы камера могла с высокой точностью зафиксировать проплывающие расселительные стадии к подводной части устройства крепится панель белого цвета, она расположена параллельно водной глади и погружена на три — пять сантиметров в воду. Чтобы минимизировать участие человека в этом процессе, к системе будет подключен искусственный интеллект (далее ИИ), который будет в режиме реального времени вести подсчет статобластов. С целью грамотного мониторинга окружающей среды, было принято решения поплавки разработать в виде “крыльев”, которые будут обеспечивать сбор

статобластов с одного метра водной глади. Также в рамках прототипа у самого начала технической трубы будет подвешена емкость с дозатором биоцида. Когда ИИ понимает, что число расселительных стадий превышает критическое значение, будет запускаться программа, так называемого, временного лага. Затем подается сигнал на дозатор о впрыскивании биоцида [Алексеев, Самченко, 2024].

Статоболласты очень хорошо защищены, их плотная оболочка не пропускает физического воздействия и не чувствительна к химическому. По этой причине мы даем статоболластам осесть на субстрат и начать фазу активного роста. В этой стадии мшанки особенно уязвимы к химическому воздействию. Они только начнут закрепляться на стенках труб, но еще не сформируют плотный защитный панцирь. Этот этап занимает от двенадцати часов до двух суток. Этот период и называется временным лагом для подачи биоцида [Гонтарь, 2012].

Для того чтобы точно рассчитать, когда впрыскивать биоцид и в каком количестве ИИ необходимо получать четкое изображение. Камера должна быть в первую очередь не восприимчива к воздействию воды и суметь заснять объект размером от одного до 5 миллиметров. Для этого камера должна находиться максимально близко к водной глади, но при этом охватывать весь поток воды, проплывающий под ней. Используется цифровая камера для фотографирования и видеозаписи через микроскоп. Камера делает снимки с разрешением 1600x1200 пикселей. Высокая частота кадров при записи – до 20 кадров в секунду. Система обработки изображений, основанная на нейросетях, обнаруживает биопомехи. Программа считает в реальном времени статоболласты, проплывающие на поверхности воды под камерой. Корпус – водонепроницаемый и устойчивый к коррозии материал, обеспечивающий защиту всех внутренних компонентов устройства [Алексеев, Самченко, 2024].

Устройство должно иметь источник энергии, эту роль будут выполнять солнечные панели для функционирования без постоянной подзарядки.

Солнечные панели не только обеспечат автономность работы устройства, но и не будут негативным образом влиять на окружающую среду. Он не издаёт шума и не выделяют веществ в природную среду, что особенно важно для безопасности СТВ станции. Для наиболее эффективной работы таких систем была выдвинута гипотеза о необходимости использования сканирующего устройства. Хотя над водоемом охладителем преобладают антициклоны, все равно необходимо ориентировать на наиболее перспективный наклон. Для определения оптимального положения панели солнечных батарей система содержит малогабаритное сканирующее устройство, осуществляющее перед включением батареи сканирование небесного пространства. И перед включением в работу панелей происходит ориентирование их в пространстве [Шилин и др, 2021]. Также устройство должно быть оборудовано аккумуляторами, в качестве альтернативного источника энергии. Интегрированные GPS и система датчиков для локализации и мониторинга устройства через сайт с локальной сетью. Система удалённой передачи данных для информирования операторов о состоянии водоема и количестве биоцида.

Для того чтобы ИИ смог наиболее точно обнаружить и подсчитать расселительные “личинки”, на внутреннюю поверхность устройства были добавлены ультрафиолетовые лампы, которые смогут подсветить хитин в флотобластах и отличить их от мелкого мусора и микропластика, которые могут содержаться в водоеме охладителя. Иногда ультрафиолет применяют для водоподготовки в тепловых станциях, однако против организмов обрастателей, в особенности против расселительных стадий он крайне неэффективен. Так как планируется использование маломощных ламп, то проникающей способности ультрафиолета будет недостаточно, чтобы навредить экосистеме, тем более белая пластина не даст ультрафиолету пройти глубже пяти сантиметров [Гребенькова, Смирнов, 2021].

Выбор материала самой белой пластины проводился опытным путем. Рассматривались: влагостойкий пластик, полипропилен, матовое стекло и

водонепроницаемый картон. Материалы сравнивались по весу, прочности и скорости застывания. Выяснялось, что влагостойкий пластик, наиболее подходящий для целей данной пластины [Абрахимов и др, 2011].

2.2 Моделирование прототипа

Различные аспекты использования устройства отрабатывали на прототипах, созданных специально для тестирования определенных функций.

Цель прототипа 1 – проработка эргономики. Работа над прототипом позволила эффективно разместить различные узлы и тестировать устойчивость, а также служила для представления проекта на выставках и конференциях. Создана масштабная модель прибора со всеми ключевыми узлами: металлический каркас, который также служил соединением с поплавками; поплавки; диоды – симуляторы ультрафиолетового освещения; симулятор камеры; картонный каркас; белый плотный лист картона. Была выдвинута идея использовать в качестве поплавков пенопласт. Была выбрана форма прямоугольников со сторонами три на пять на двадцать сантиметров. Два одинаковых прямоугольника склеивались друг с другом и вставлялись в металлический каркас в двух местах так, чтобы вода могла беспрепятственно проходить под устройством. В ходе испытаний первого устройства на воде было выяснено, что данная форма поплавков не устойчива с точки зрения переворота устройства, но при этом выполняет функции фиксации на водной глади. Данные выводы учитывались при дальнейших сборках.

Также проходила акселерация проекта на предприятии из реального сектора экономики. Акселерация включала в себя подготовку модели-прототипа устройства, апробацию его работы на системах водоснабжения АЭС и необходимую доработку по результатам этих испытаний с участием персонала заинтересованных цехов САЭС, для акселерации подготовлено 2 – модели прототипа. Один для испытания работы видеосъемки и сбора данных

для обучения нейронных сетей. Второй прототип создан для проверки свойств плавучести, устойчивости и эргономики устройства.

Важнейший функционал устройства — это получение видеографических данных о плывущих на поверхности воды статобластов. Получение такого рода информации подразумевает использование короткофокусной камеры высокого разрешения, так как размер объектов составляет 0,5–2 мм. Такие камеры представлены на рынке. В качестве прототипа использовали камеру JVC, модель - GZ-R315DE. Данная модель камеры позволяет снимать видео с разрешением 1920x1080 пикселей. Процессор FALCONBRID позволяет очень быстро обрабатывать большой объем данных, что необходимо в условиях сильного течения воды. Также данная камера обладает 40-кратным оптическим зумом, что позволяет получать видеоряд высокого качества и дает возможность разбивать его на отдельные четкие кадры для детального обучения нейронной сети. Видеокамера способна работать в течение пяти часов, что позволило отснять большое количество материала.

Для фиксации видеокамеры использовали стационарную установку (рис. 2.1), представляющую собой штатив с телескопическими ножками, устанавливаемый на дно водоема, использование штатива, а не плавающей платформы обусловлено необходимостью подбора фокусного расстояния камеры, исследования влияния внешних факторов (освещение, волнение, фон) на качество записи. Таким образом решились две задачи: возможность заснять поверхность воды и устойчивость к течению, которые в условиях подводящего и отводящего канала составляют более одного метра в секунду. Путем эксперимента была выбрана максимально подходящая высота съемки и засняты статобласты. Также была подтверждена необходимость использования белой пластины в качестве фона для камеры. Штатив при этом был дополнительно утяжелен грузами. Данная установка выполнила поставленные задачи, а также помогла собрать больше данных с Десногорского водохранилища.



Рисунок 2.1 - модель-прототип два

Модель-прототип размещали в отводящем канале САЭС (рис. 2.2) (схема расположения места испытаний). Так как характеристики течения в нем аналогично условиям подводящего канала, но количество статобластов в период проведения испытаний (весна) выше. Подводящие каналы служат для доставки технической (циркуляционной) воды из резервуара к прибрежным насосным станциям и водозаборным сооружениям станции. Представляют собой открытые земляные (частично бетонные) каналы прямоугольного сечения. Длина каналов определяется расстоянием от уреза воды до насосной станции (обычно порядка 0,5–1,5 км). Ширина канала — от 10 до 30 м, глубина — 3–5 м (по проектным данным станции). Назначение отводящего канала - отток подогретой воды обратно в водоем охладитель. По своей структуре этот канал схож с подводящим. Конечная часть канала выходит непосредственно в зону смешения вод. Каналы проектировались таким образом, чтобы вода успевала предварительно остыть, перед попаданием в систему технического водоснабжения для охлаждения.

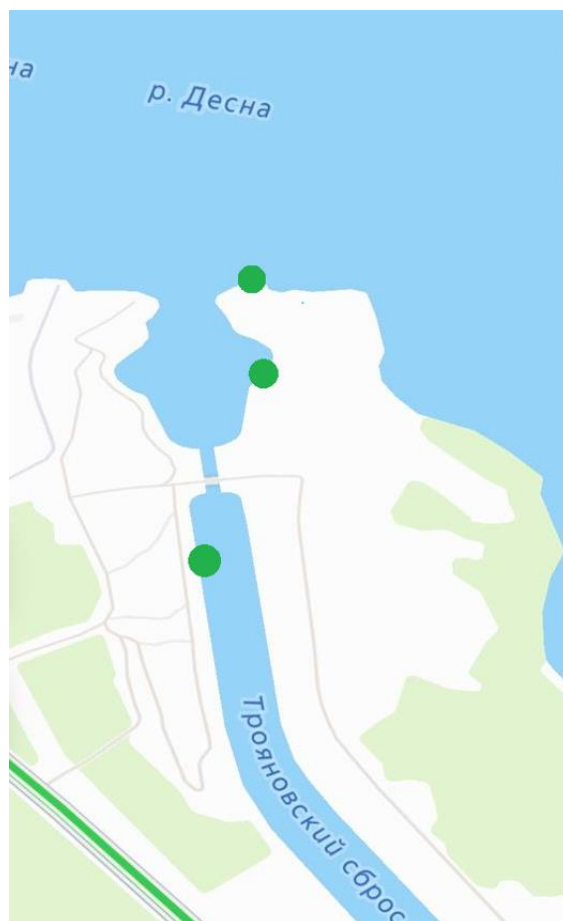


Рисунок 2.2 – Места проведения испытаний

Штатив прочно устанавливали на глубине от 0,3 до одного метра и на расстоянии от берега от 0,5 до 1,5 метров. Фокус выстраивали как в настройках видеокамеры, так и регулируя высоту расположения камеры относительно уровня воды (таблица 1). Для изучения влияния внешних факторов проводили видеозаписи в различных условиях: с использованием и без использования белой подложки. Также располагали камеру с разных сторон по отношению к направлению на солнце.

Таблица 1 - ход испытаний

№ испытания	зум/расстояние до воды	с использованием подложки	направление на солнце	количество записей	№ испытания	зум/расстояние до воды	с использованием подложки	направление на солнце	количество записей
1	1х/0,45м	нет	против	3	24	3х/0,3м	да	по	3
2	1х/0,45м	нет	по	3	25	3х/0,15м	нет	против	3
3	1х/0,45м	да	против	3	26	3х/0,15м	нет	по	3
4	1х/0,45м	да	по	3	27	3х/0,15м	да	против	3
5	1х/0,3м	нет	против	3	28	3х/0,15м	да	по	3
6	1х/0,3м	нет	по	3	29	4х/0,3м	нет	против	3
7	1х/0,3м	да	против	3	30	4х/0,3м	нет	по	3
8	1х/0,3м	да	по	3	31	4х/0,3м	да	против	3
9	2х/0,45м	нет	против	3	32	4х/0,3м	да	по	3
10	2х/0,45м	нет	по	3	33	4х/0,15м	да	против	3
11	2х/0,45м	да	против	3	34	4х/0,15м	да	по	3
12	2х/0,45м	да	по	3	35	5х/0,45м	да	против	2
13	2х/0,3м	нет	против	3	36	5х/0,45м	да	по	2
14	2х/0,3м	нет	по	3	37	5х/0,3м	да	против	3
15	2х/0,3м	да	против	3	38	5х/0,3м	да	по	3
16	2х/0,3м	да	по	3	39	5х/0,15м	да	против	3
17	2х/0,15м	нет	против	3	40	5х/0,15м	да	по	3
18	2х/0,15м	нет	по	3	41	6х/0,45м	да	против	1
19	2х/0,15м	да	против	3	42	6х/0,45м	да	по	1
20	2х/0,15м	да	по	3	43	6х/0,3м	да	против	2
21	3х/0,3м	нет	против	3	44	6х/0,3м	да	по	2
22	3х/0,3м	нет	по	3	45	6х/0,15м	да	против	2
23	3х/0,3м	да	против	3	46	6х/0,15м	да	по	2

Для проверки свойств плавучести и устойчивости на место акселерации был привезен модель-прототип три (рис. 2.3). Корпус модели распечатан на 3D принтере и включает в себя крепления для поплавков. Материал поплавков подбирался опытным путем в лабораторных условиях. По результатам эксперимента наибольшей устойчивостью обладал пенопласт. Форма поплавков представляет собой своеобразные крылья (рис. 2.3), что повышает устойчивость прибора к волнению и позволяет создать для статобластов определенный коридор. Под понятием «коридор» подразумеваются вытянутые концы крыльев, расстояние между которыми один метр. Такая форма

поплавков позволяет собирать и анализировать расселительные стадии с одного метра водной глади, а также упрощает проведение расчетов. Поплавки расположены в два яруса, что также повышает устойчивость устройства и создает вертикальную стену сбора данных равную шесть сантиметров.

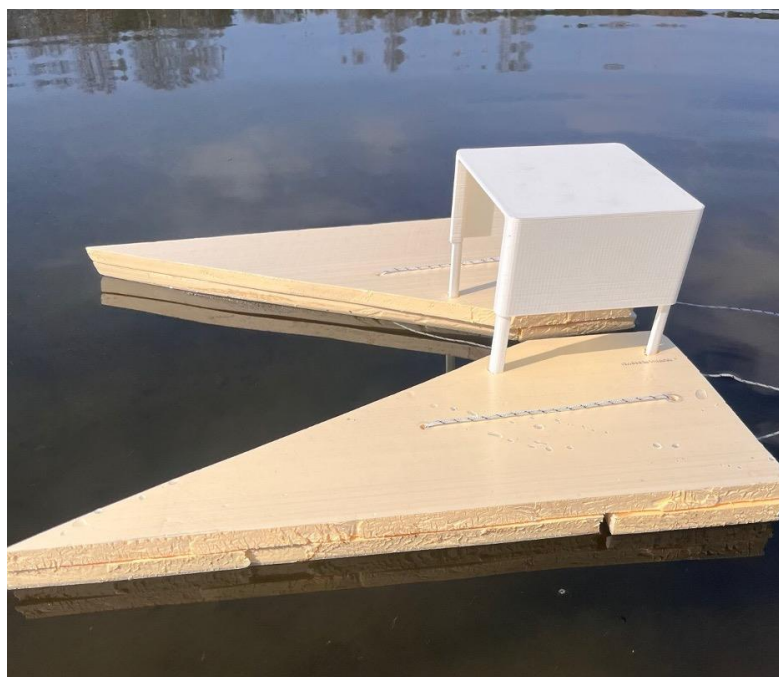


Рисунок 2.3 – модель-прототип три

Муляж камеры крепится к верхней стенке корпуса. Она выбрана в соответствии с размером корпуса и расстоянием до водной глади. В макете предусмотрены встроенные пазы для ультрафиолетовых ламп. В крыльях-поплавках расположены специальные отверстия для крепления якоря. В каждом крыле их два. Якорь представляет собой металлическую пластину, которая подвешена на веревках и имеет четыре места соприкосновения (рис. 2.4). Длина веревки регулируется вручную, в зависимости от глубины места испытания. Для веса металлическая пластина дополнительно может утяжеляться грузами.



Рисунок 2.4 – строение якоря модели - прототипа два

В течение часа макет находился в подводящем канале САЭС под воздействием течения примерно равного один метр в секунду и не изменил своего местоположения расстояние, на котором макет находился от берега, равно одному метру, а глубина 0,6 метров. Также волновые явления не опрокинули, но изменили ориентацию в пространстве макета. В связи с этим были внесены изменения в положение видеокамеры в корпусе и скорректированы размеры поплавков. В ходе производственной практики оба модели – прототипа прошли полевые испытания и выполнили поставленные задачи. Ключевым этапом развития проекта послужил отзыв руководителя практики и советы сотрудников цеха обеспечивающих систем. Все последующие наработки будут, по возможности, учитывать рекомендации и полученный опыт в ходе этой практики.

3 ОПИСАНИЕ УСТАНОВКИ

Установка представляет собой, по сути, функциональный модуль видеонаблюдения, поэтому основными компонентами являются: видеокамера, система передачи и обработки информации, и собственно корпус самого устройства, обеспечивающий плавучесть и его фиксацию в воде.

3.1 Конструктивное решение установки

Основной задачей поплавков является фиксация камеры в определенном положении над водой. При этом важно, чтобы волновые процессы не влияли на качество съемки видео.

В результате тестов отводящем канале САЭС было принято решение изменить конструкцию поплавков (рис. 3.1) макета-устройства. Главным изменением служит снижение ширины “крыльев”, что не скажется на устойчивости прибора, но при этом позволит снизить площадь соприкосновения с водой и затрачиваемый материал. Также изменилось место крепления якоря к поплавкам (на рис. 3.1 обозначено цифрой 1), что позволяет повысить устойчивость прибора к волновым явлениям и избежать отклонения устройства относительно водозабора.

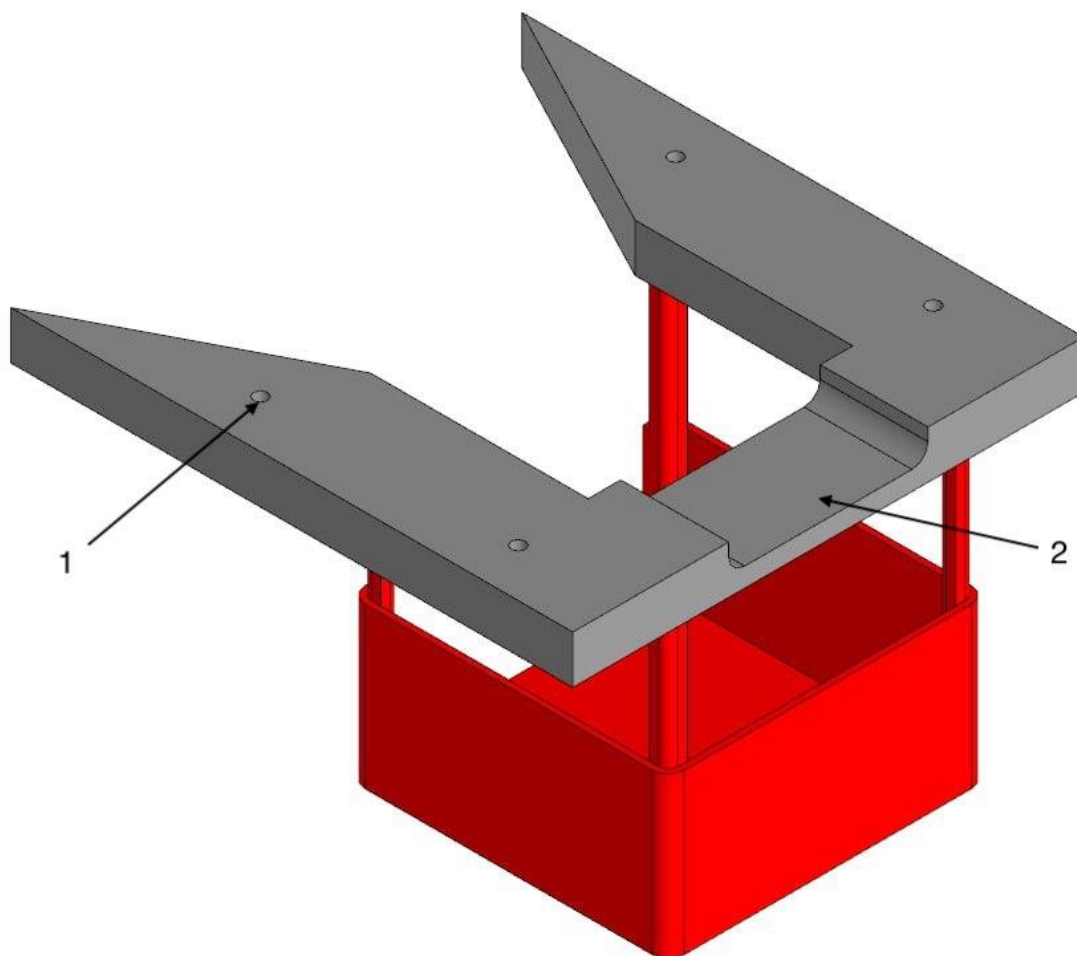


Рисунок 3.1 - вид снизу, изменения в конструктивном решении поплавков устройства (пояснения в тексте)

Также сами поплавки стали единой конструкцией, а не двумя отдельными частями. Это изменение позволяет главному корпусу устройства надежно крепиться к одному большому блоку, что увеличивает стабильность всей конструкции в целом. В ходе испытаний на САЭС сильно затруднялась задача именно из-за низкой устойчивости отдельных крыльев-поплавков.

В результате изменений с конструктивным решением поплавков получается собирать данные о статобластах с большего количества воды (а именно 50 см шириной), чем если бы она беспрепятственно текла под устройством, именно для этого в устройстве крылья-поплавки выпирают вперед. Эта длина позволяет также упростить дальнейшие расчеты.

Из-за того, что крылья-поплавки образуют своего рода сопло, вода с увеличенной скоростью попадают в образовавшуюся, из-за новой конструкции,

замкнутую область. Образовавшееся давление от скорости воды может оказывать влияние на стабилизацию устройства и возможно скапливание мусора в данной области. Для решения этих проблем в корпусе устройства предусмотрено отверстие (обозначено 2 рис. 3.1), которое обеспечит отток воды.

Также вся электрическая система обеспеченности проведена непосредственно в поплавках. Защиту от ударов и дефектов обеспечивает не трескающийся синтетический материал, который образует каркас поплавков. Внутренняя часть заполнена вспененным, не впитывающим воду, материалом.

Одной из задач, поставленных отраслевым наставником, было сделать отслеживание местоположения прибора в пространстве более легким и быстрым. Данную задачу будет выполнять проблесковый маячок.

Главным изменением в эргономике стало крепление к внешней стороне прибора проблескового маячка (рис 3.2). Данное дополнение позволит облегчить представителям отдела безопасности АЭС отслеживание местоположения устройств на случай возникновения отрыва крепления якоря и возможного попадания устройства в водозабор станции. Так как маячок будет одной из самых удаленных от воды точкой устройства, появляется необходимость проверки устройства на устойчивость.

Еще одним важным изменением, которое хотел бы видеть отраслевой наставник проекта, изменение цвета устройства. Любые яркие цвета также помогли бы отслеживать местоположение прибора охране АЭС, например красный (рис. 3.2).

После испытания устройства на САЭС было принято решение погрузить аккумуляторы в поплавки устройства, с целью повышения устойчивости прибора (рис. 3.3). Это обусловлено тем, что аккумуляторы являются самой тяжелой его частью, более 700 г. На практике муляжом аккумулятора служил прямоугольный блок, который крепился к различным местам устройства и отслеживалось его влияние на устойчивость. Самыми подходящими местами

для крепления аккумулятора стали все предполагаемые точки крепления под водой или на крыльях-поплавках. Также выявлено, что наиболее целесообразно использовать два идентичных аккумулятора. Это связано с тем, что при дополнительной нагрузке на одно из крыльев-поплавком, прибор начинает крениться в эту сторону и его стабилизация требует дополнительного оснащения. Также при нагрузке на заднюю ось прибора повышается вероятность его опрокидывания. Именно поэтому в корпусе поплавков-крыльев сделаны пазы для погружки аккумуляторов и включения их в систему. Надежно предотвращают их вываливание тросы от якоря, которые проходят сразу над поплавками.

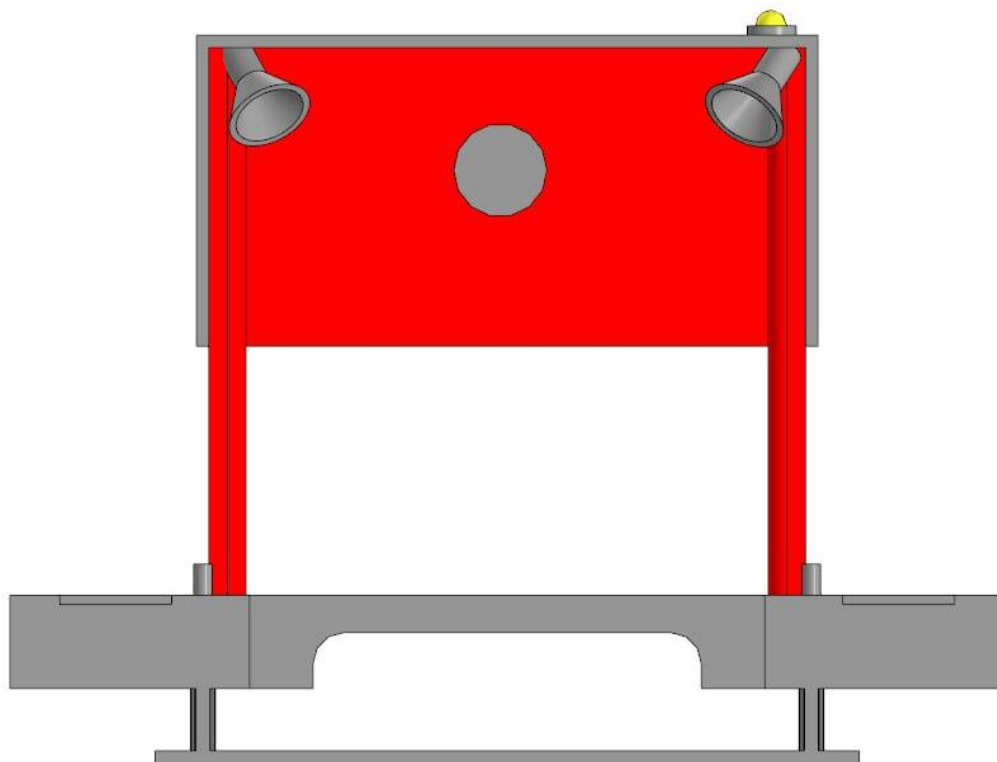


Рисунок 3.2 - поперечный разрез устройства

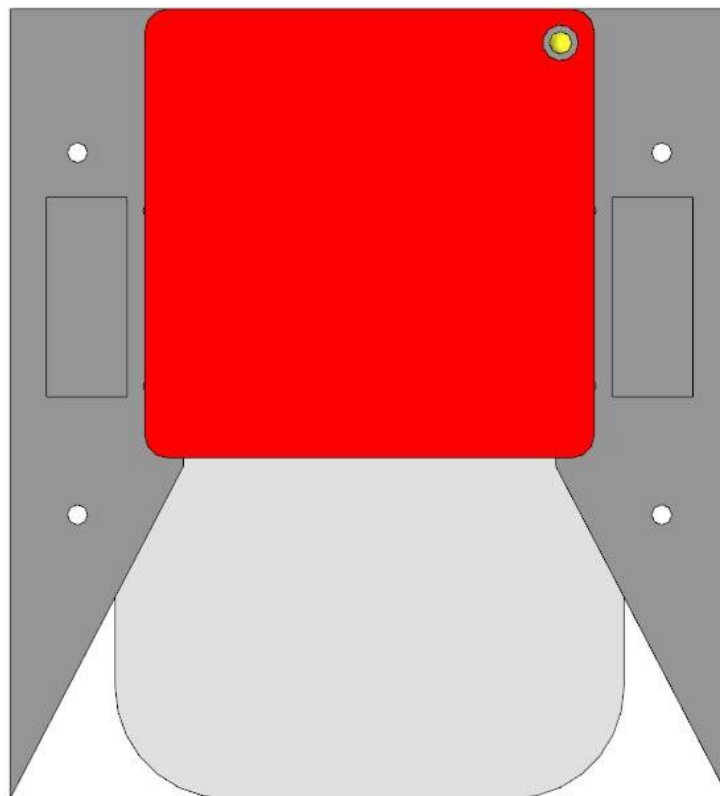


Рисунок 3.3 - вид сверху, места расположения аккумуляторов

Так как разработанный якорь хорошо зарекомендовал себя в полевых испытаниях, принято решение оставить его в финальном прототипе-устройстве (рис. 2.4). Он выполнен из трех металлических пластин соединенных шестью болтами. Дополнительно четыре болта торчат вниз из нижней пластины, предполагается, что таким образом якорь надежнее будет прикреплен к субстрату. Якорь соединён с устройством с помощью веревок или тросов и имеет 4 точки крепления на самом якоре.

Одним из главных узлов устройства являются ультрафиолетовые лампы. Они служат для подсветки проплывающего под устройством материала и помогают ИИ определять статобласты.

Ультрафиолетовые лампы крепятся во внутренней части устройства (рис 3.2). Данные места позволяют направить свет на пластину и осветить всю область осмотра камеры. Предполагается использование от видимого УФ-спектра до примерно 250 нм.

Во время съемки материала для обучения нейронной сети не на всех видео использовалась белая подложка. И при дальнейшей обработке кадров выявлено, что распознавание биопомех практически невозможно. Появилась задача внедрить белую пластину-фон в финальный прототип.

В поплавках-крыльях дополнительно предусмотрены отверстия, а в четырех местах. Далее пластина с крепежными столбами соединяется между собой болтами. От глубины закручивания болта зависит глубина расположения белой пластины (рисунок 3.4 обозначение 2). Так как белая пластина расположена под водой, то с целью снижения сопротивлению потока столбы (рис. 3.4 пункт 1) выполнены обтекаемой формой. В них непосредственно закручивается болт. На поверхности поплавков болты скрывают колпачки (пункт 3 рис. 3.4).

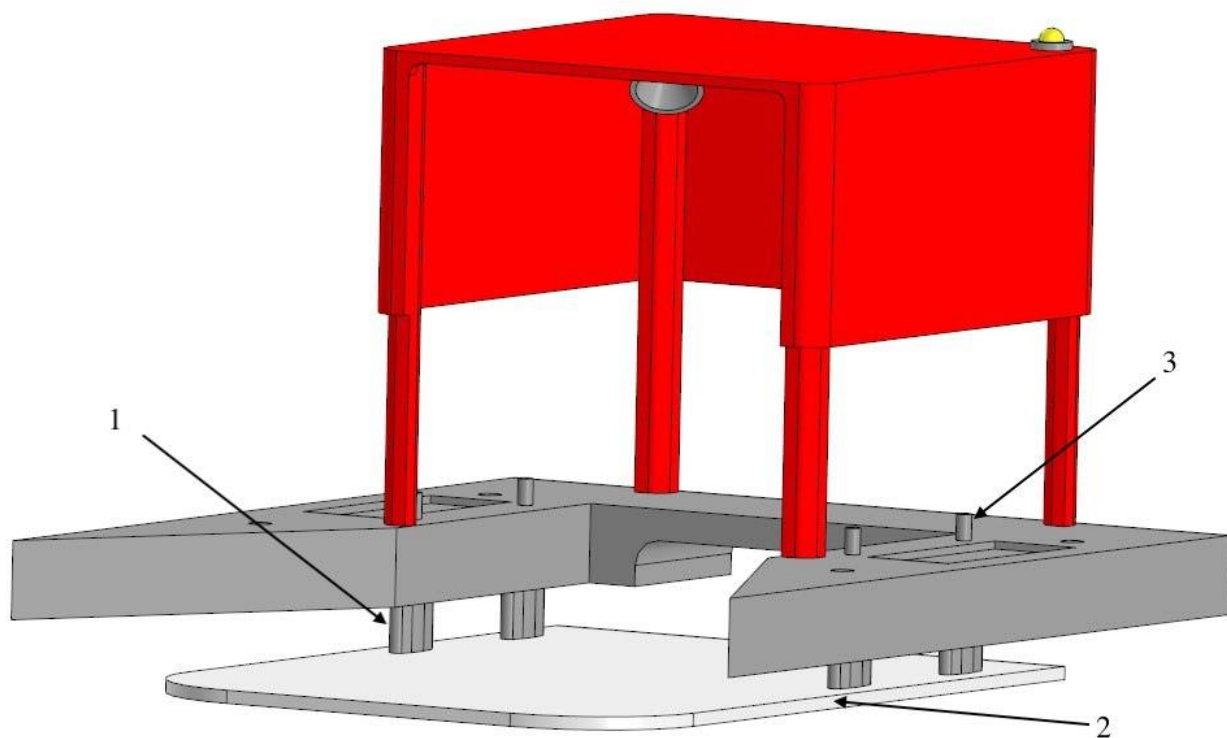


Рисунок 3.4 решение фона съемки, обозначения в тексте

Одной из важнейших задач является поддержание автономности и бесперебойности работы устройства. Заряд в аккумуляторах поддерживается с помощью солнечной батареи, вмонтируемой на верхнюю поверхность устройства (рис. 3.5). Предполагается, что солнечная батарея заряжает один из

аккумуляторов в то время, как на поддержание системы работает второй. Таким образом устройство работает автономно и не расходует энергию из других источников. Также солнечная энергетика является примером выработки зеленой электроэнергии.

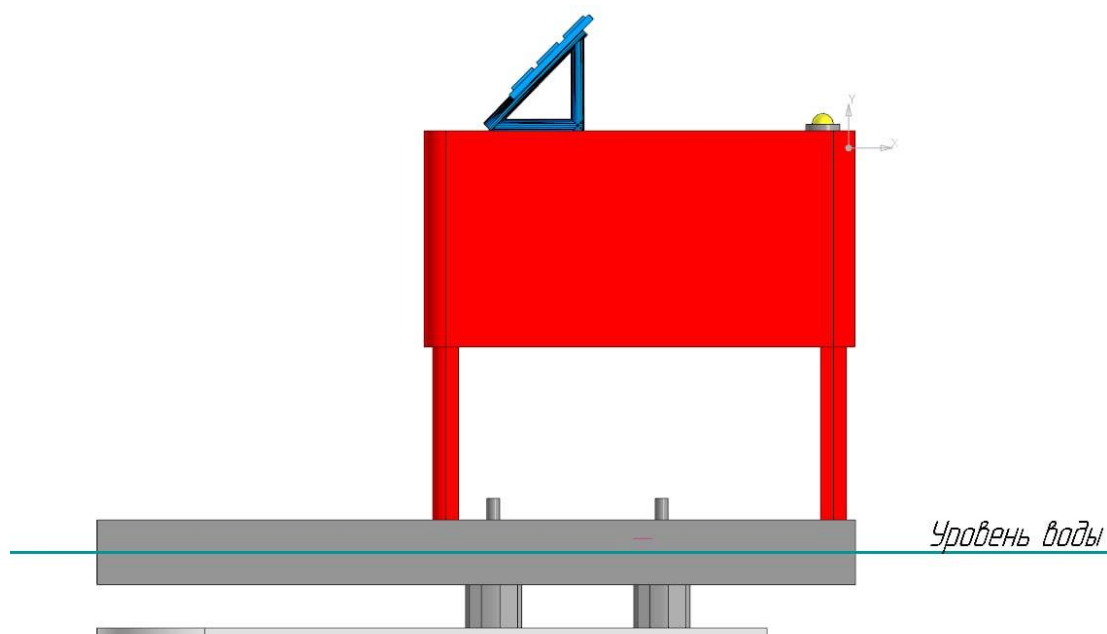


Рисунок 3.5 - устройство, вид с боку

Ключевым узлом устройства является камера, ее расположение и выполняемые функции не изменились. Опытным путем выбрано оптимальное расстояние до воды 10–15 см. основные требования к камере легкость и компактность, так как места в коробке устройства не так много. На рисунке 3.2 показано место крепления камеры к корпусу устройства, туда же проведены все требуемые коммуникации.

Так как вся электронная техника работает в непосредственной близости к воде, помимо гидроизоляции, принято решение спрятать процессор, соединяющие провода в тело крыльев-поплавков. Подробно на схеме (Рис 3.6) разобран электрический облик устройства.

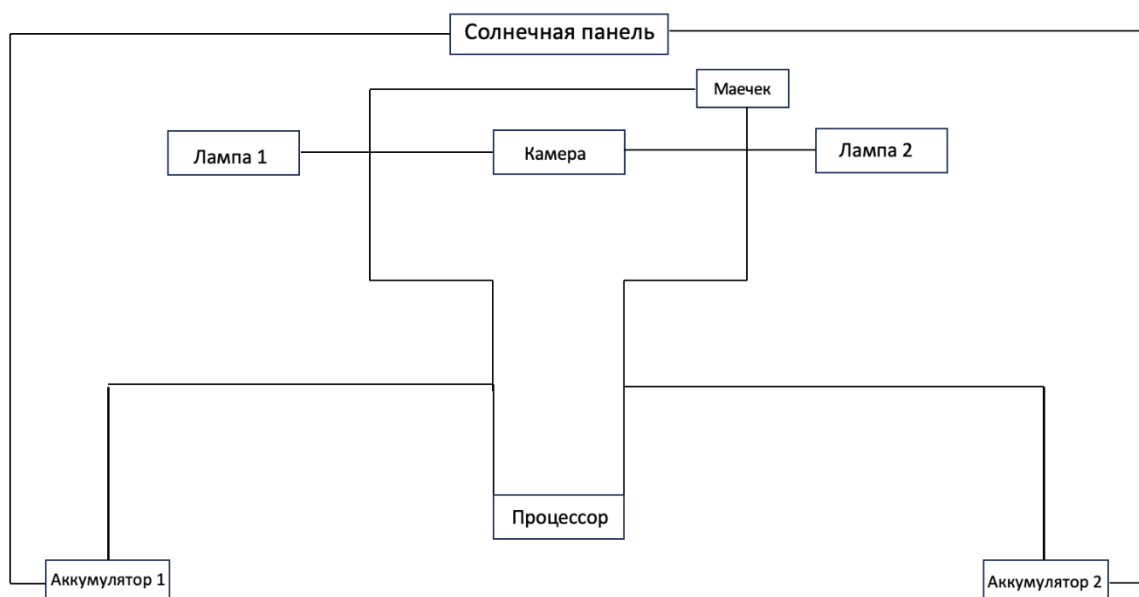


Рисунок 3.6 – схема установки

Таким образом разработанное устройство учитывает специфику выполняемых действий и готово проходить проверки на дальнейших стадиях внедрения в эксплуатацию.

3.2 Параметры видеорегистрации

При выборе оборудования для видеорегистрации крайне важно учитывать совокупность технических параметров, напрямую влияющих на качество анализа изображения, особенно в задачах, связанных с применением искусственного интеллекта и машинного зрения. В рамках данной работы приоритетными являются параметры, обеспечивающие чёткое распознавание объектов в динамичной среде, таких как проточная вода или закрытые полости с нестабильным освещением. В ходе практики и обработки видеорядов подтвердилась необходимость получения изображений высокого разрешения, поскольку объект наблюдения — статобласты — имеет небольшой размер и требует высокой детализации. Наиболее оптимальным для таких условий является разрешение 1920×1080 пикселей (Full HD). Более высокое разрешение (например, 4K) хоть и даёт лучшие визуальные результаты, но требует

значительных ресурсов хранения и обработки, а также может вызывать увеличение задержек при передаче.

Одновременно с разрешением важно учитывать частоту кадров (frames per second, fps). С учётом движения воды и скорости возможной смены положения объекта частота не должна быть менее 30 fps, чтобы избежать размытости и потери информации при покадровом анализе.

Эффективность хранения и передачи видеопотока также определяется кодеком, который используется для сжатия данных. Наиболее распространёнными являются H.264 и более современный H.265 (HEVC), позволяющий получить лучшее качество при меньшем битрейте. Кодек напрямую влияет на задержку (латентность) и на нагрузку на процессор при декодировании видео, что важно при использовании нейросетевых алгоритмов анализа. В нашем случае также важен выбор контейнера данных, поскольку обрабатывать их придется в реальном времени. Был выбран контейнер mp4.

Важным параметром является наличие системы стабилизации изображения, особенно в условиях нестабильной установки камеры или вибрации от окружающей среды. Например, функция HyperSmooth, применяемая в камерах GoPro, обрабатывает изображение в режиме реального времени, создавая эффект плавной съёмки. Такая стабилизация особенно полезна при записи в движении или в условиях течения воды, а также позволит снизить влияние волновых явлений.

Камера также должна обеспечивать высокое качество съёмки в условиях низкой освещённости, поскольку освещение в коробе устройства может быть ограничено, а солнечный свет — экранирован. Для этого необходим сенсор с высокой светочувствительностью и поддержкой ночного режима. Это обеспечивает получение полезной информации даже при минимальной внешней подсветке, что критично для бесперебойного наблюдения.

Так как камера может быть частью сетевой системы, параметр временной задержки (latency) становится критичным. Он зависит от используемого кодека,

битрейта, мощности встроенного процессора и качества соединения. Минимизация задержки особенно важна при обработке данных в реальном времени, когда каждый кадр передаётся на сервер или устройство с ИИ-модулем. Камеры с высокой задержкой существенно снижают общую производительность системы.

Выбор видеокамеры для научных и исследовательских задач требует комплексного подхода к оценке её характеристик. Ключевыми параметрами являются разрешение и частота кадров, светочувствительность, уровень задержки и стабильность видеопотока. В рамках данной работы целесообразным является использование камеры, поддерживающей Full HD при 30 кадров/с, с функцией стабилизации, низкой задержкой, высокой светочувствительностью и возможностью беспроводной передачи данных [Попов, 2025].

3.3 Автоматизированная система управления и программное обеспечение

Автоматизированная система управления активно применяется в самых разных сферах жизни в современной промышленности. В частности, они используются в системах управления дорожного движения, грузовых работ, в сферах государства, банков, образования и промышленного хозяйства.

Автоматизированная система управления (АСУ) представляет собой комплекс аппаратно-программных средств по оптимизации работы оборудования. Целью АСУ является увеличение рентабельности производства и повышение эффективного использования при работе на предприятиях промышленной и энергетической сферы.

Чтобы автоматизировать систему управления нужно:

Подготовить техническое задание;

Спроектировать инженерную систему;

Подобрать оптимальное системное и прикладное программное обеспечение;

Установить, подключить, наладить и проверить работоспособность системы:

Обучить персонал эксплуатировать систему

Техническое задание на разработку автоматизированной системы управления:

1. Наименование системы

Автоматизированная система для борьбы с мшанковым обрастанием в системе технического водоснабжения.

2. Основание для разработки

Необходимость автоматизированного мониторинга и с использованием нейронной сети для анализа поверхности воды на наличие биопомех.

3. Структура системы:

Устройство

Камера с датчиком аккумулятора и wi-fi модулем

·Центральный ПК

·Веб-сервис

·Программное обеспечение

·Дозатор с датчиком

4. Функциональные требования:

4.1. Камера

делает фотографию раз в 20 секунд

передает фотографию на центральный ПК

·Передает состояние аккумулятора камеры на центральный ПК

4.2. Центральный ПК

Принимает фотографии с камеры

·обрабатывает фотографии с помощью программного обеспечения с нейронной сетью

·Передает количество статобластов на веб-сервис

- передает сигнал на датчик дозатора на подачу биоцида в воду, когда количество статобластов программное обеспечение насчитает больше 1000

- передает состояние аккумулятора камеры на веб-сервис

4.3. Датчик дозатора

- Принимает сигнал от центрального ПК

Активизирует либо отключает подачу биоцида из дозатора

4.4. Веб-сервис

- Принимает информацию от центрального ПК

Отображает информацию

4.5. База данных

- Хранит информацию

Требования к протоколам

- Передача фотографий, данных и управление через wi-fi модуль

- Обмен данных центрального ПК с веб-сервисом через протокол HTTP

REST API

На основании технического задания была разработана архитектура IoT-системы (рис. 3.7), обеспечивающая распределенное взаимодействие между устройствами, датчиками и исполнительными компонентами [45]. Архитектура включает в себя следующее:

- Умная камера с модулей Wi-Fi, передающая сделанные фотографии с промежутком в 20 секунд;

- Датчик аккумулятора, передающая состояние заряда аккумулятора на веб-сервис по модулю Wi-Fi;

- Датчик дозатора, который по команде программного обеспечения, включается, когда программное обеспечение с помощью нейронной сети насчитает больше 1000 статобластов (рис. 3.8);

- Роутер, с помощью чего и передается информация. Он обладает сверхбыстрым двухдиапазонным маршрутизатором Wi-Fi 6, который

увеличивает скорость до 5700 Мбит в секунду с каналами 160 МГц для повышения эффективности и пропускной способности;

- Сервера, обладающие IONOS VSP, которые обеспечивают доступность до 99,99% времени безотказной работы благодаря резервированию инфраструктуры, также IONOS обладает защитной функцией от DDoS атак.

- Центральный ПК, который отвечает за визуализацию данных, при помощи веб-сайта;

- Веб-сайт, предназначенный для мониторинга работы устройств;

- База данных (рис. 3.9), которая хранит полученные фотографии с камеры;

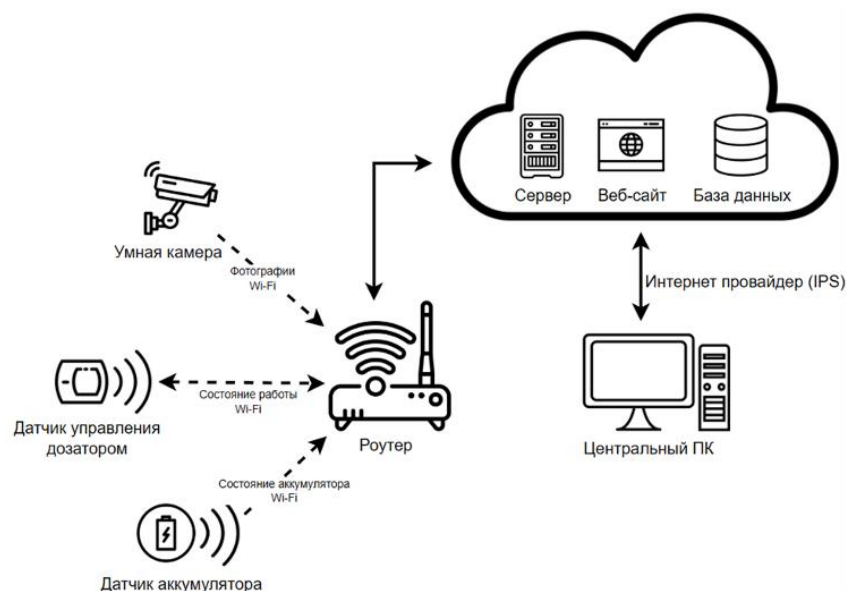


Рисунок 3.7 – Архитектура IoT-схемы

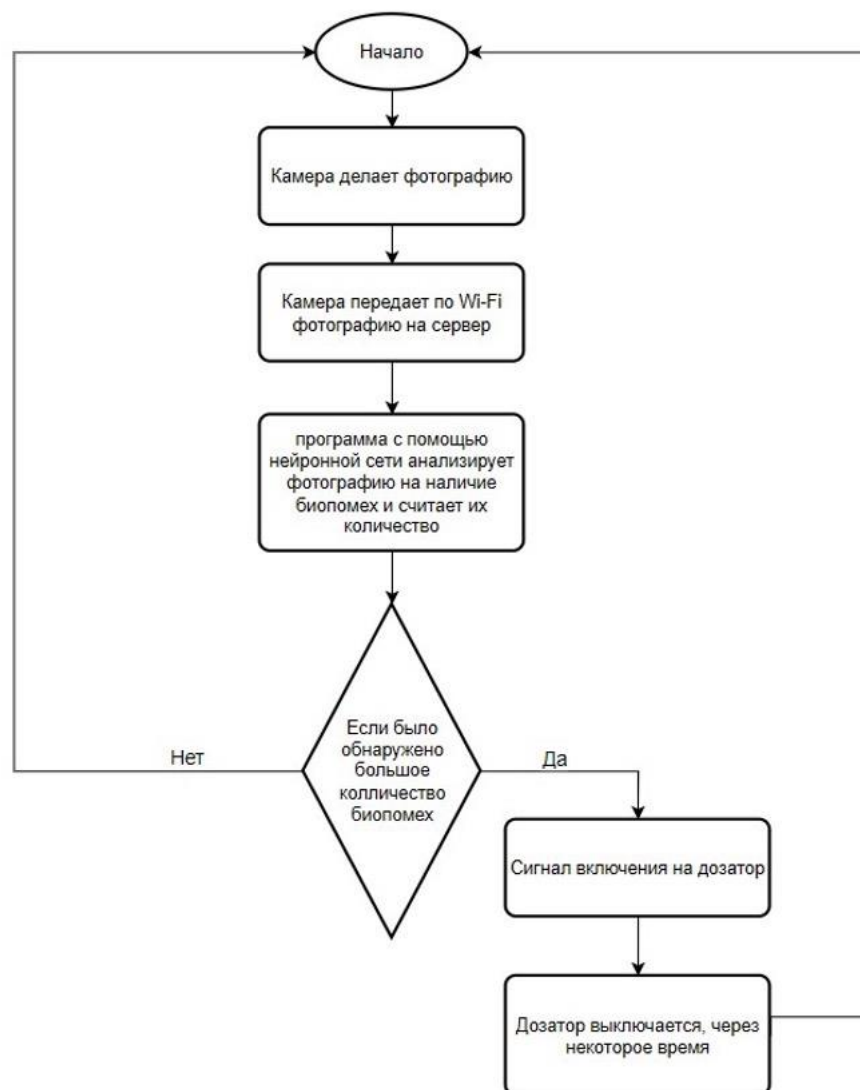


Рисунок 3.8 – Блок схема работы датчика дозатора

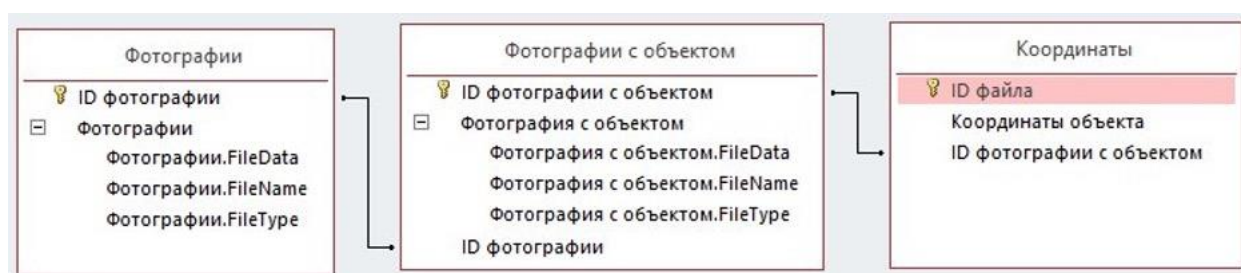


Рисунок 3.9 – Схема базы данных

3.4 Система передачи данных и обработки информации

Структура искусственной нейронной сети представляет из себя направленный граф, в качестве узлов которого выступают нейроны, а в качестве линий – связи с весовыми коэффициентами. Чтобы понять принцип работы искусственной нейронной сети можно на примере перцептрона – одной

из первых моделей нейронной сети. Модель персептрона представлена на рисунке 3.10.

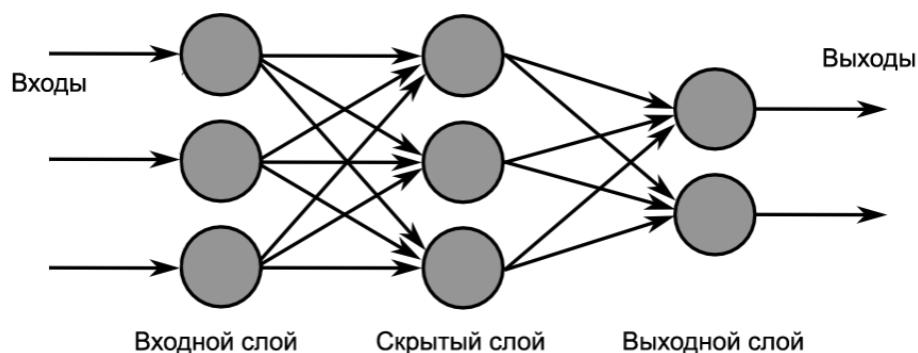


Рисунок 3.10 – Модель персептрона

Существует несколько архитектур нейронных сетей, созданных для определения объектов. Они разделяются на «двухуровневые», такие как RCNN, и «одноуровневые», такие как YOLO.

Для нашей задачи подойдет архитектура YOLO, так как она эффективней «двухуровневых». Эффективней, потому что данная архитектура за один «прогон картинки» через нейронную сеть делает все необходимые определения объектов (рис. 3.11).

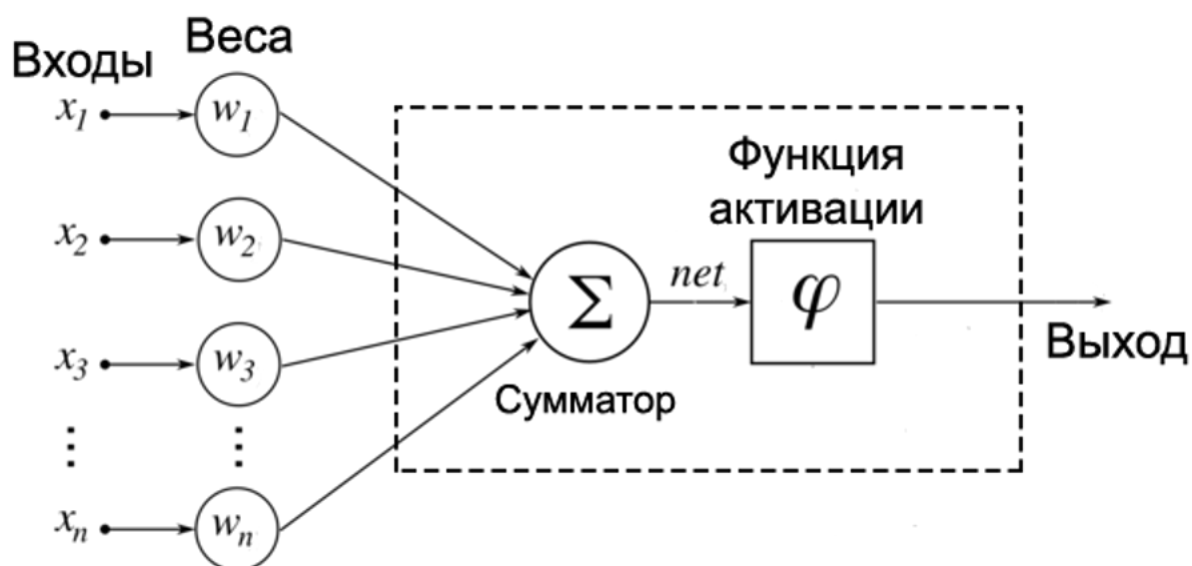


Рисунок 3.11 – Пример вывода определения объектов

Реализация

Реализовывали нейронную сеть с помощью “одноуровневой” архитектуры YOLOv8 [46]. Для обучения было сделано два видео (рис. 3.12) и разбиты по кадрам (рис. 3.13), чтобы создать bounding box (рис. 3.14). Они нужны для обучения нейронной сети, так как служат аннотацией. С новой строки пишется класс объекта, далее координаты объекта, вес, ширина и высота (рис. 3.15).

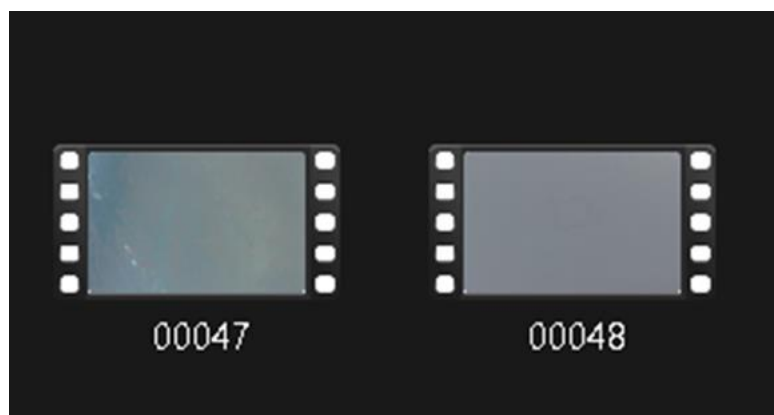


Рисунок 3.12 – Видео для обучения нейронной сети

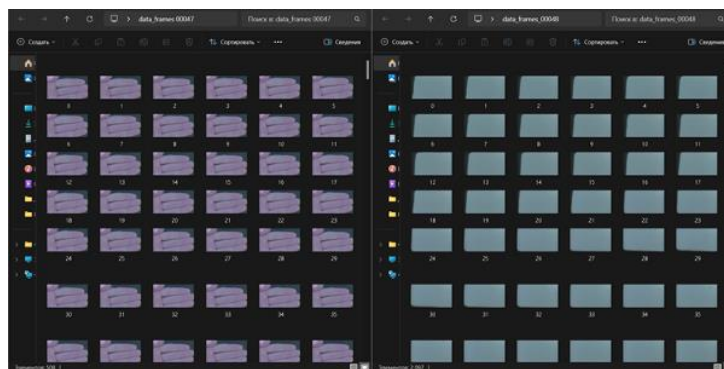


Рисунок 3.13 – Кадры для создания bounding box

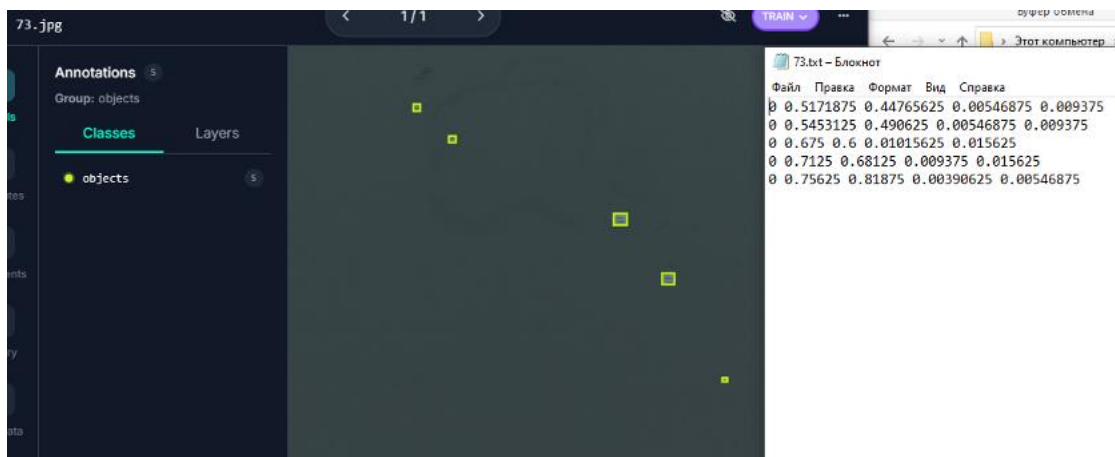


Рисунок 3.14 – Bounding box

<класс> <x_center> <y_center> <width> <height>

Рисунок 3.15– Структура аннотации к фотографии

Далее была написана программа для обучения нейронной сети по видео (рис. 3.16) и создание папок для фотографий и разметки (рис. 3.17).

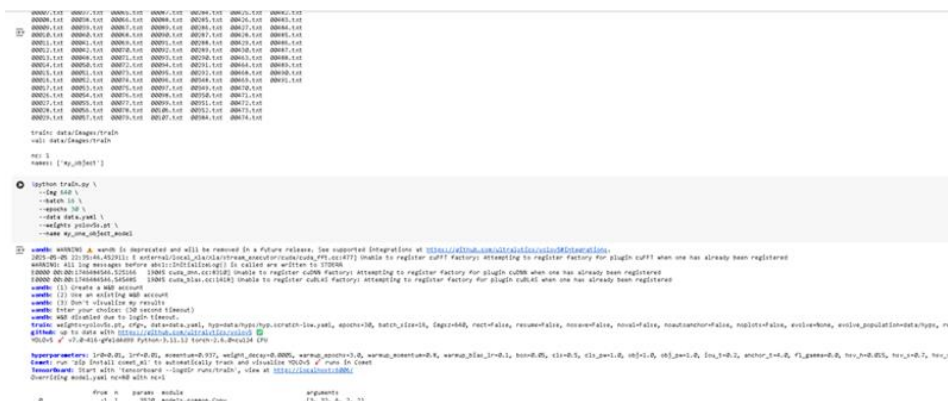


Рисунок 3.16 – Обучение нейросети

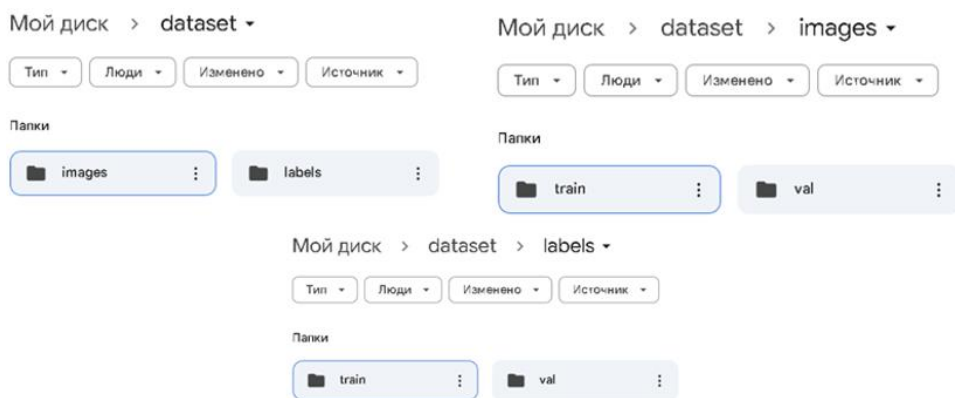


Рисунок 3.17 – Подготовленные папки

Обучение и тестирование нейронной сети проходило на размеченной выборке, включающая 100 фотографий. Для проверки успешного узнавания статоблсатов использовал отложенную выборки фотографий, которая не была использованная для обучения. Нейронная сеть обучена на архитектуре YOLOv8 с использованием фреймворка PyTorch, анализ проведен на ПК.

Для оценки результатов работы нейронной сети для анализа поверхности воды на наличие биопомех были использованы стандартные метрики компьютерного зрения: точность, полнота, среднее значение между точностью и полнотой, скорость работы модели [Shanmugamani, 2018].

Оценка результатов работы нейронной сети представлена в таблице 2 и на рисунке 3.18.

Таблица 2 – Оценка результатов работы нейронной сети

Метрика	Значение
Точность	0,91
Полнота	0,87
Среднее значение между точностью и полнотой	0,89
Скорость работы модели	12 кадров в секунду

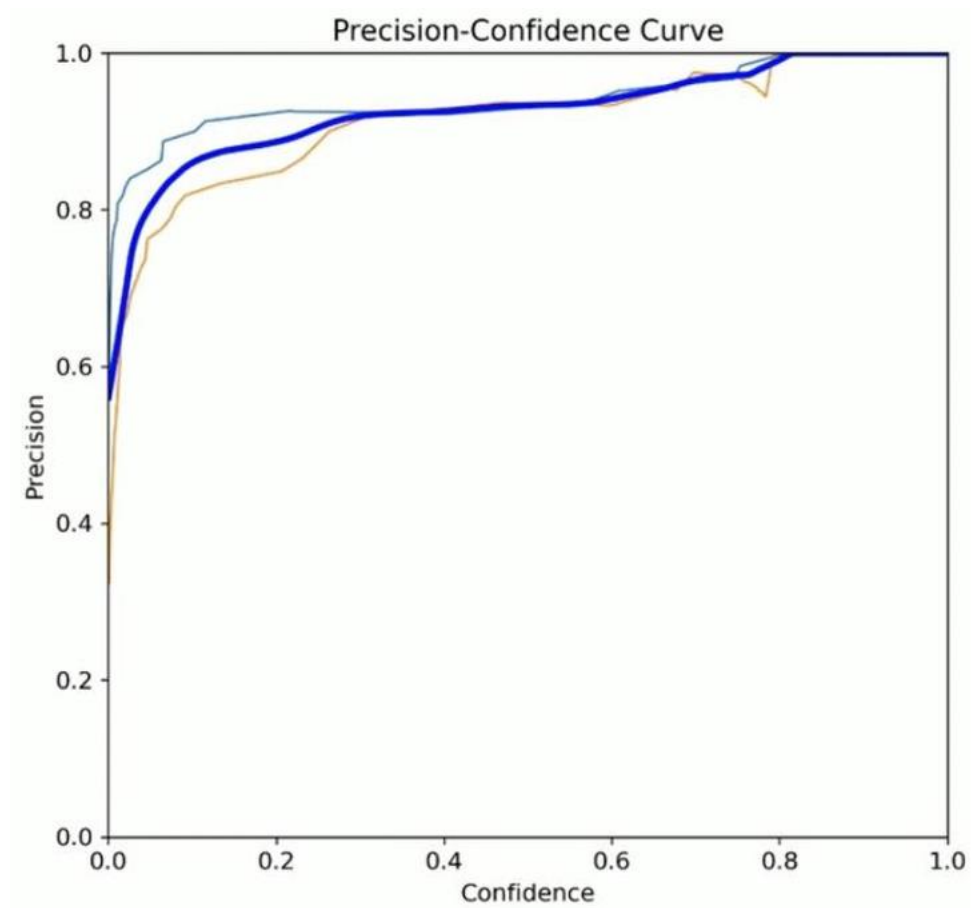


Рисунок 3.18 – График изменения точности успешного узнавания статобластов

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Биологические особенности мшанок определяют высокую опасность для систем водоснабжения. Их способность формировать колонии из хитиновых трубок сохраняющихся даже после отмирания организмов приводят к эффективному удержанию влекомых водой взвешенных частиц. Мшанки эффективно наращивают биомассу особенно в условиях проточной воды, что также характерно техно-экосистем их способность расселяться с помощью вегетативных почек - статобластов, устойчивым к неблагоприятным воздействиям внешней среды способствует эффективному проникновению в различные узлы системного водоснабжения.

Самый уязвимый момент жизни обростателей — это небольшой период времени после того, как расселительные стадии осела и начала активный рост, но до того, как сформировала защитный панцирь (Хитиновую трубку). Этот период занимает от одного дня до трех суток. Поэтому необходимо разработать установку, которая будет способна уничтожать организмов - обростателей, в частности, мшанку в тот период, когда они только прикрепляется на трубах.

Для оперативного контроля массового попадания статобластов в систему технического водоснабжений необходимо устройство, которое способна в автономном режиме отслеживать их количество. Разработанное устройство с помощью поплавков удерживается на поверхности воды. Центральным узлом является камера, которая снимает поверхность воды. Внутри работают ультрафиолетовые лампы, в свете которых, хитиновая оболочка статобластов становится более заметна на фоне воды. Внутренняя поверхность устройства выполнена из белого пластика, что облегчает распознавание статобластов. Полученные с видеокамеры снимки передаются по радиосвязи на компьютер, где обрабатываются с помощью машинного зрения. Там происходит распознавание статобластов и их подсчет в режиме реального времени. Данная информация может передаваться пользователям системы – персоналу АЭС для

принятия необходимых мер. При достижении определенного количества статобластов автоматически запускается сброс биоцида в систему, чтобы уничтожить, начинающие формироваться, обрастания.

Данная установка, созданная на базе искусственного интеллекта, подает сигнал на дозатор в емкость с биоцидом с заранее посчитанным временным лагом для наибольшей эффективности действия биоцида и препятствия прикреплению организмов на стенках труб. Также есть возможность мониторинга всего процесса дистанционно с помощью ПК.

Была на практике доработана эргономика модели-прибора. Опытным путем усовершенствовалась каждая деталь установки. А также подготовлен пул видео статобластов для обучения нейронных сетей. В результате мы получили работающую систему распознавания со скоростью двенадцать кадров в секунду и значением между точностью и полнотой 0,89.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Rao T. S., Kora A. J., Chandramohan P., Panigrahi B. S., Narasimhan S. V. Biofouling and microbial corrosion problem in the thermo-fluid heat exchanger and cooling water system of a nuclear test reactor // *Biofouling*. – 2009. – Vol. 25, No. 7. – P. 581–591. – DOI: 10.1080/08927010903016543.
2. Satpathy K. K., Mohanty A. K., Sahu G., Biswas S., et al. Biofouling and its control in seawater cooled power plant cooling water system – A review // In: *Nuclear Power*.
3. Shanmugamani R. *Deep Learning for Computer Vision*. – Birmingham: Packt Publishing, 2018. – 274 p.
4. Vogel, S. *Comparative Biomechanics: Life's Physical World*. – Princeton: Princeton University Press, 2003. – 580 p.
5. Абдрахимова, Е. С. Сушильные свойства керамических масс / Е. С. Абдрахимова, В. З. Абдрахимов, А. В. Абдрахимов // *Известия высших учебных заведений. Строительство*. – 2003. – № 4(532). – С. 64-69. –
6. Алексеев, А. В. Бизнес-идея установки для контроля биологического обрастания / А. В. Алексеев, И. С. Самченко // XVIII Ежегодная научная сессия аспирантов и молодых ученых : материалы Всероссийской научной конференции (с международным участием), Вологда, 25–29 ноября 2024 года. – Вологда: Вологодский государственный университет, 2025. – С. 417-419.
7. Проблемы создания защитных покрытий нового поколения от коррозии, биообрастания и обледенения для морских, береговых и сухопутных объектов / Д. Ю. Власов, А. А. Грибанькова, А. С. Дринберг [и др.]. – Санкт-Петербург : Санкт-Петербургский государственный экономический университет, 2021. – 132 с. – ISBN 978-5-7310-5491-1.
8. Гонтарь В.И. New species and new genera of Cheilostomata from the Weddell Sea, Antarctica (Bryozoa) // Springer Science+Business Media B.V., Formerly Kluwer Academic Publishers B.V.– 2002. – С. 285.
9. Aladin N. V., Plotnikov I. S., Smurov A. O. & Gontar V. I. (2004) The role of introduced animal species in the ecosystem of the Aral Sea. In: *Biological Invasions in Aquatic and Terrestrial Ecosystems* (eds A. F. Alimov & N. G. Bogutskaya), pp. 275–296. KMK, Moscow–St. Petersburg (in Russian).
10. Sanzhak, Y. O. First finding of freshwater bryozoans *Lophopodella carteri* Hyatt, 1866 in the Kylian delta of the Danube River / Y. O. Sanzhak, A. V. Lyashenko, V. I. Gontar // *Russian Journal of Biological Invasions*. – 2012. – Vol. 3, No. 1. – P. 29-33. – DOI 10.1134/S2075111712010092.
11. Гонтарь, В. И. Мшанки южнорусских морей и их отношение к солёности / В. И. Гонтарь // *Труды Зоологического института РАН*. – 2013. – Т. 317, № S3. – С. 84-89.
12. Гонтарь, В. И. Эволюционные тенденции у Bryozoa как иллюстрация некоторых положений Ч. Дарвина. Некоторые проблемы в интерпретации гетероморфии и колониальной интеграции у мшанок / В. И. Гонтарь // XXVII ЛЮБИЦЕВСКИЕ ЧТЕНИЯ. Современные проблемы эволюции и экологии : Сборник материалов международной конференции, Ульяновск, 05–07 апреля 2013 года / Баранцев Р.Г., Зелеев Р.М., Савинов А.Б., Масленников А.В., Артемьева Е.А., Марковцева О.Ю., Бородина О.Е., Малявин С.А.. – Ульяновск: Ульяновский государственный педагогический университет им. И.Н. Ульянова, 2013. – С. 98-105.
13. Гонтарь, В. И. Роль мшанок в донных биоценозах моря Лаптевых / В. И. Гонтарь // *Человек и Север: антропология, археология, экология: Материалы всероссийской*

- конференции, Тюмень, 06–10 апреля 2015 года. Том Выпуск 3. – Тюмень: Институт проблем освоения Севера СО РАН, 2015. – С. 315-318.
14. Гонтарь, В. И. Мшанки (Bryozoa, Polyzoa, Ectoprocta) пресных водоемов России / В. И. Гонтарь // Алтайский зоологический журнал. – 2010. – № 4. – С. 52-62.
15. Горская, О. И. Биолого-химический мониторинг Ростовской АЭС как эффективный инструмент предупреждения биологических помех в системах циркуляционного и технического водоснабжения / О. И. Горская // Глобальная ядерная безопасность. – 2022. – № 4(45). – С. 6-15.
16. Гребенькова, Смирнов, 2021
17. Denisenko, N. V. New species of the genus *Parasmittina* (Bryozoa: Cheilostomata: Smittinidae) from the Chukchi Sea / N. V. Denisenko // *Zoosystematica Rossica*. – 2015. – Vol. 24, No. 2. – P. 303-306. – DOI 10.31610/zsr/2015.24.2.303.
18. Denisenko, N. V. Species richness and the level of knowledge of the bryozoan fauna of the Arctic region / N. V. Denisenko // *Proceedings of the Zoological Institute RAS*. – 2020. – Vol. 324, No. 3. – P. 353-363. – DOI 10.31610/trudyzin/2020.324.3.353.
19. Евсеева, О. Ю. Мшанки (Bryozoa) морей Лаптевых и Восточно-Сибирского: современные исследования / О. Ю. Евсеева // Труды Кольского научного центра РАН. – 2021. – Т. 12, № 3(9). – С. 59-67.
20. Егорова, А. С. Возможные пути решения проблемы биообрастания систем технического водоснабжения промышленных предприятий Тверской области / А. С. Егорова, Г. В. Черкаев, Е. А. Чихонадских // Актуальные проблемы экологии и охраны труда : сборник статей XVI Международной научно-практической конференции, Курск, 31 мая 2024 года. – Курск: Юго-Западный государственный университет, 2024. – С. 155-159.
21. Золотухин, В. В. Методические рекомендации по изучению мшанок / В. В. Золотухин // Концептуальные и прикладные аспекты научных исследований и образования в области зоологии беспозвоночных : Сборник статей V Международной конференции, Томск, 26–28 октября 2020 года. – Томск: Национальный исследовательский Томский государственный университет, 2020. – С. 200-203.
22. Исследование ультраструктурных особенностей взаимоотношений мшанок и их бактериальных симбионтов / Н. П. Карагодина, А. Э. Вишняков, О. Н. Котенко [и др.] // ЗООЛОГИЯ беспозвоночных - НОВЫЙ ВЕК : материалы конференции, посвященной 160-летию Кафедры зоологии беспозвоночных Биологического факультета МГУ им. М.В. Ломоносова, Москва, 19–21 декабря 2018 года. – Москва: Без издательства, 2018. – С. 57.
23. Роль оценки биологического фактора в обеспечении безопасной эксплуатации сложных технических систем в течение жизненного цикла / Г. М. Бухарев, А. Б. Лаптев, Т. В. Яковенко, Т. В. Бобырева // Климат-2017. Проблемы оценки климатической стойкости материалов и сложных технических систем : сборник докладов II Всероссийской научно-технической конференции : посвящена 120-летию со дня рождения великого советского ученого, авиаконструктора Роберта Людвиговича Бартини, Геленджик, 03–04 августа 2017 года. – Геленджик: Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов, 2017. – С. 21-30.
24. Лукин, В. Б. Формирование видовой структуры и сезонная сукцессия перифитона в водопроводном канале : специальность 03.00.16 : автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата биологических наук / Лукин Владимир Борисович. – Москва, 2003. – 24 с.
25. Минин, Д. В. Использование флотационных устройств для экологической мелиорации городских водотоков / Д. В. Минин, А. Л. Суздалева // Экология урбанизированных территорий. – 2012. – № 1. – С. 56-58.

26. Михненко, Д. М. Защитные структуры приуральских мшанок (ранняя Пермь) из стерлитамакских шиханов, Россия / Д. М. Михненко, З. А. Толоконникова // Геология, геоэкология и ресурсный потенциал Урала и сопредельных территорий. – 2022. – № 10. – С. 95-99.
27. Методы борьбы с биообрастаниями на атомной электростанции / Н. А. Мороз, Е. Л. Неврова, Т. Н. Замыслова [и др.] // Проблемы создания защитных покрытий нового поколения от коррозии, биообрастания и обледенения для морских, береговых и сухопутных объектов. – Санкт-Петербург : Санкт-Петербургский государственный экономический университет, 2021. – С. 94-103.
28. Мухин, И. А. Развитие мшанок как источник биологических помех системам водоснабжения атомных электростанций в условиях нагрева воды / И. А. Мухин, М. Д. Петухова, Т. Н. Осинцева // Предупреждение и ликвидация чрезвычайных ситуаций в Арктической зоне Российской Федерации материалы научно-практической конференции, Мурманск, 04–07 апреля 2023 года. – Мурманск: Мурманский арктический государственный университет, 2023. – С. 232-234.
29. Мухин, И. А. Формирование перифитонных цилиосообществ на разнотипных субстратах: специальность 03.02.08 "Экология (по отраслям)": автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата биологических наук / Мухин Иван Андреевич. – Борок, 2014. – 23 с.
30. Мухин, И. А. Формирование перифитонных цилиосообществ на разнотипных субстратах / И. А. Мухин. – Вологда : Вологодский государственный университет, 2020. – 159 с. – ISBN 978-5-87851-889-5.
31. Мухин, И. А. Освоение субстратов разной архитектуры экоморфологическими группами прикрепленных инфузорий / И. А. Мухин // Фундаментальные исследования. – 2013. – № 10-14. – С. 3115-3119.
32. Воздействие ультразвука на формирование таксоцены диатомовых на искусственных субстратах с целью защиты систем технического водоснабжения атомных электростанций / Е. Л. Неврова, А. Н. Петров, Н. А. Мороз, А. Б. Касьянов // Вопросы современной альгологии. – 2023. – № 2(32). – С. 192-194. – DOI 10.33624/2311-0147-2023-2(32)-192-194.
33. Орлова, М.И. Биообрастание, морские и континентальные воды: теория, практика, перспективы региональных междисциплинарных исследований / М.И. Орлова, В.А. Родионов // Фундаментальная и прикладная гидрофизика. – 2020. – Т. 13, № 4. – С. 121-136.
34. Полтаруха, О. П. Об изучении сукцессии сообщества обрастания на противообрастающих покрытиях / О. П. Полтаруха // Экология моря. – 2000. – Т. 52. – С. 39-43.
35. Попов Е. Как работает видеокамера: от объектива до видеопотока [Электронный ресурс] // Habr. – 2020. – URL: <https://habr.com/ru/articles/514450/> (дата обращения: 22.05.2025).
36. Серова, К. М. Организация полиморфных зооидов мшанок отряда Cheilostomata: сравнительный анализ и эволюционные тенденции: диссертация на соискание ученой степени кандидата биологических наук / Серова Ксения Михвйловна, 2023. – 139 с.
37. Синельщиков, Ю. Н. Микроперифитон скальных пород берега Ладожского озера / Ю. Н. Синельщиков, И. А. Мухин // Геоэкологические проблемы Европейского Севера и Арктики: Материалы межрегиональной молодежной научно-исследовательской конференции, Архангельск, 15–16 февраля 2019 года / Под общей редакцией Н.К. Максutowой. – Архангельск: Бюджетное учреждение культуры Вологодской области «Вологодская областная универсальная научная библиотека им. И.В. Бабушкина», 2019. – С. 117-120.

38. Скальская, И. А. Сукцессии зооперифитона в малой реке / И. А. Скальская // Биология внутренних вод. – 2012. – № 3. – С. 59.
39. Тамберг, Ю. Ю. ПИЩЕВОЕ ПОВЕДЕНИЕ ПОКРЫТОРОТЫХ МШАНОК *Cristatella mucedo* И *Plumatella fungosa* (Bryozoa, Phylactolaemata) / Ю. Ю. Тамберг, Н. Н. Шунатова, П. А. Лезин // Зоологический журнал. – 2014. – Т. 93, № 3. – С. 508. – DOI 10.7868/S0044513414030143.
40. Патент на полезную модель № 205638 U1 Российская Федерация, МПК H02J 3/32. Устройство автоматической ориентации панели солнечных батарей : № 2021110971 : заявл. 19.04.2021 : опубл. 23.07.2021 / А. Н. Шилин, А. А. Шилин, И. А. Исаев ; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Волгоградский государственный технический университет".
41. Сравнительная нейроморфология лофофора и стенки тела трех видов пресноводных мшанок (Bryozoa, Phylactolaemata) / К. В. Шунькина, В. В. Старунов, О. В. Зайцева, А. Н. Островский // Зоологический журнал. – 2014. – Т. 93, № 3. – С. 497. – DOI 10.7868/S0044513414030118.
42. Щербак, С. Д. Мшанки малых рек Украины и их роль в формировании сообществ обрастания: специальность 03.00.18: автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата биологических наук / Щербак Сергей Дмитриевич. – Москва, 1994. – 24 с.
43. Ягунова, Е. Б. Колония инкрустирующей мшанки *Cribrilina annulata* (Fabricius, 1780) как многоуровневая живая система (Организация, динамика, изменчивость): специальность 03.00.08 : диссертация на соискание ученой степени кандидата биологических наук / Ягунова Екатерина Борисовна. – Санкт-Петербург, 2006. – 185 с.
44. IoT-устройства: определение, применение, преимущества и будущее технологий [Электронный ресурс] // Sofiot.ru. – URL: <https://sofiot.ru/blog/poleznye-materialy-iot/iot-ustroystva-opredelenie-primenenie-preimushchestva-i-budushchee-tekhnologiy/> (дата обращения: 21.05.2025).
45. How to Train YOLOv5 on a Custom Dataset [Электронный ресурс] // Roboflow Blog. – URL: <https://blog.roboflow.com/how-to-train-yolov5-on-a-custom-dataset/> (дата обращения: 19.05.2025).