

ОЛИМПИАДА ШКОЛЬНИКОВ «ШАГ В БУДУЩЕЕ»
ПО ПРОФИЛЮ «ИНЖЕНЕРНОЕ ДЕЛО»

регистрационный номер

Секция: Химические технологии
название секции

Разработка конструкции и программного комплекса системы мониторинга
экологической обстановки водных объектов, находящихся под угрозой
загрязнения объектами химического производства
название работы

Автор:

Минаев Александр Владимирович
фамилия, имя, отчество
ГБОУ Школа №1517, 11 «И» класс
наименование учебного заведения, класс

Научный руководитель:

Смирнов Иван Алексеевич
фамилия, имя, отчество
ФГУП ЦНИИХМ
место работы
научный сотрудник
звание, должность

подпись научного руководителя

Москва - 2024

АННОТАЦИЯ

Объект исследования – экологическая обстановка водных объектов. Предмет исследования - мониторинг экологической обстановки водных объектов, находящихся под угрозой загрязнения предприятиями химической промышленности.

Цель проекта - разработка комплекса мониторинга экологической обстановки водных объектов, находящихся под угрозой загрязнения предприятиями химической промышленности.

В работе было проведено исследование, в ходе которого установлено, что существующие системы мониторинга экологической обстановки водных объектов не обладают полноценным комплексом датчиков для изучения влияния химической промышленности на минерализацию, кислотность, температуру воды, и, что важно, на распределение этих показателей на различных глубинах, выделение органических газов. Также было установлено, что отсутствуют системы мониторинга этих показателей состояния воды в колодцах, используемой для децентрализованного водоснабжения. На основании полевых исследований было определено повышенное содержание метана в колодце на западе Подмосковья и отсутствие на юге, что говорит о разложении органических веществ в воде, предназначенной для водоснабжения, в первом случае, и как следствие, необходимости мониторинга этого показателя для оперативного оповещения граждан. На основании научных данных, содержащих информацию о водных объектах Московского региона, была определена необходимая длина соединительного кабеля и установлено, что такая система необходима для оперативного исследования экологической обстановки.

Содержание

ВВЕДЕНИЕ	2
1. Научно – исследовательская часть	4

1.1	Обзор и классификация _____	4
1.2	Классификация задач, выполняемых аппаратами мониторинга водной среды ____	6
1.3	Разработка программно-аппаратного комплекса _____	7
1.3.1	Выбор основного вычислительного элемента блока управления комплекса ____	8
1.3.2	Выбор датчиков для снятия показаний _____	9
2.	Конструкторская часть _____	12
2.1	Определение общего вида и компоновки изделия _____	12
2.2	Создание изделия _____	16
3.	Конструкторская часть _____	16
3.1	Определение общего вида и компоновки изделия _____	16
ЗАКЛЮЧЕНИЕ _____		16

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время на рынке отсутствуют готовые системы комплексного экологического мониторинга водоёмов, находящихся в непосредственной близости от объектов химической промышленности: существующая аппаратура, например, не может отслеживать одновременно и качество воды, и выбросы органических газов, выделение которых свидетельствует об анаэробном разложении органических веществ под водой, а также усиливает парниковый эффект.

Фактическое отсутствие, например, государственного контроля выброса метана из колодцев приводит к тому, что научные данные в этой сфере крайне разрозненны, что затрудняет выявление актуальных проблем; тем не менее, это важно, так как, например, в 1987 году выброс отходов производства органической химии в г. Кириши Ленобласти существенно повлиял на здоровье местного населения. [1]

Было проведено изучение открытых источников и полевые исследования, отправлены запросы в различные фирмы, подтвердившие отсутствие профилографов комплексного анализа таких показателей, как рН (водородный показатель), TDS (Total Dissolved Solids, общая минерализация), одновременно имеющих модуль, измеряющий концентрацию

органических газов, что важно - на западе Подмосковья было обнаружено выделение таковых из шахты колодца, предназначенного для отбора питьевой воды, что говорит о анаэробном разложении органических веществ, и, как следствие, необходимости мониторинга этого показателя.

Кроме того, в 2020-х гг. отмечается увеличение доли подземных вод (до 46 %) в общем балансе источников хозяйственно-питьевого водоснабжения. В связи с этим встаёт задача мониторинга соответствия экологического состояния подземных вод нормам, установленным СанПин. Так, например, этим стандартом установлено максимальная концентрация растворённых частиц 1000-1500 мг/л [2], и мониторинг в этих пределах вполне осуществим с помощью дешевых и доступных датчиков TDS (Total Dissolved Solids), а за уровнем воды можно следить (с целью планирования потребления воды) с помощью измерения гидростатического давления. Начиная с последних десятилетий 20 в. наблюдается загрязнение подземных вод, основными источниками которого являются накопители отходов и сточные воды промышленных предприятий, нефтепромыслов, складов горюче-смазочных материалов, а также сельскохозяйственные и бытовые стоки [3]. В связи с этим становится актуальной проблема мониторинга водных объектов в целом, так как загрязнённые поверхностные воды также могут стать причиной загрязнения питьевых подземных вод. Датчик давления воды, удобный для мониторинга уровня воды в колодце, делает прибор подходящим для использования в качестве профилографа, что существенно расширяет круг задач, решаемых им: например, это позволит также строить профили температуры воды и, как следствие, выявлять также тепловое загрязнение промышленными предприятиями. Кроме того, разные слои водоёмов испытывают влияние разных живых организмов, и, как следствие, по-разному могут восстанавливаться после выбросов с предприятий.

Целью проекта является разработка конструкции и программного комплекса мониторинга экологической обстановки водных объектов, находящихся под угрозой загрязнения предприятиями химической промышленности.

Поставленная в работе цель достигается выполнением следующих научных задач:

1. на основе обзора известных источников информации определить исследовательские задачи;
2. на основе обзора известных источников информации составить классификацию существующих аппаратов различных типов, а также провести их анализ;
3. в соответствии с требуемыми характеристиками определить общий концепт изделия, состав и компоновку отдельных узлов и аппарата в целом;
4. спроектировать изделие, произвести численное и программное моделирование параметров прочности и устойчивости разработанных узлов, моделирование основных гидродинамических параметров изделия;
5. разработать программный комплекс для снятия показаний
6. произвести натурные и полунатурные испытания комплекса

1. Научно – исследовательская часть

1.1 Обзор и классификация

По целевому назначению и особенностям технического оснащения комплексы гидрологического мониторинга разделяют на два класса:

- профилографы CTD;
- аппараты, не оснащенные системой измерения глубины, и, как следствие, не приспособленные к созданию профилей по различным показателям (далее – аппараты основного класса);

Профилографы CTD (conductivity, temperature, depth, то есть проводимость, температура, глубина) (рисунок 1) – аппараты, оснащённые

датчиком гидростатического давления с целью построения графиков зависимости различных показателей от глубины погружения аппарата.



Рисунок 1 — Профилограф-CTD, зонд "Гидрометрика 505-УТП"

Готовое решение российского производства, включающее зонд с датчиком давления, температуры воды и минерализации (солёности). Отсутствует датчик органических газов, позволяющий выявлять анаэробное разложение органических веществ. Не имеет WiFi модуля и датчика водородного показателя (pH), что не позволяет осуществлять полноценный экологический мониторинг и сообщать его результаты в реальном времени. Использование датчика солёности, имеющего более широкий диапазон измерений, не востребованный в Центральной России, удорожает конструкцию. Аппараты основного класса (Рисунок 2) предназначены для осуществления стационарного мониторинга снятием показанием без привязки к определённой глубине. Мониторинг состояния колодцев также затруднён в связи с отсутствием внешнего датчика давления, что делает его показания неточными при долговременном мониторинге из-за колебаний атмосферного давления.



Рисунок 2 - Aquahead AP 700 [5], набор для оперативного мониторинга

Готовое решение, включающее зонд с комплексом дорогостоящих датчиков, в том числе растворенного кислорода, себестоимость которого больше, чем разрабатываемой конструкции в целом, что делает более сложным приобретение этого датчика потребителем для мониторинга воды в своем колодце, таким образом лишая прибор многофункциональности и ограничивает государственные закупки. Отсутствует датчик органических газов, позволяющий выявлять анаэробное разложение органических веществ. Не имеет WiFi модуля и датчика глубины, что исключает возможность отслеживать уровень воды в колодце и строить графики зависимости показателей от глубины погружения модуля.

В результате анализа задач, выполняемых комплексами экологического мониторинга водной среды, и существующих аналогов было принято решение разработать малогабаритный многофункциональный подводный аппарат для проведения наблюдений за уровнем и качеством воды в колодцах, а также за экологической обстановкой в водоёмах на территории, которая может быть подвергнута загрязнению вследствие аварий на предприятиях химической промышленности.

1.2 Классификация задач, выполняемых аппаратами мониторинга водной среды

Вышеуказанные комплексы предназначены для выполнения различного спектра работ в внутренних водах, морских, прибрежных и открытых акваториях и применяются для гидрофизического и экологического мониторинга.

Установка дополнительного оборудования на подводный аппарат позволяет существенно увеличить сферу применения подобных систем: в нашем случае в качестве такого оборудования выступает:

– датчик органических газов MQ-5, предназначенный для мониторинга выделения метана, который позволяет собирать данные о разложении органических веществ в анаэробных условиях (в таком случае образуется газ [6], состоящий преимущественно из метана, содержащий также сероводород, являющийся токсичным газом. Оба в смеси с воздухом являются взрывоопасными. Доли других органических газов в биогазе пренебрежимо малы, что позволяет использовать датчик органических газов как датчик метана), что может быть признаком загрязнения колодца, и оценивать влияние на парниковый эффект (метан, будучи основным составляющим «болотного газа» и учитываемый датчиком, является парниковым газом, выделившийся же в небольших количествах сероводород быстро окисляется кислородом воздуха до свободной серы и на парниковый эффект не влияет). Кроме того, разложение органических веществ в анаэробных условиях – признак недостатка растворённого в воде кислорода. В результате избытка фосфорных и азотных соединений в природных водах создаются условия для эвтрофикации – буйного роста некоторых подводных растений. Отмирающие части растений и другие органические загрязнения, попадая на дно рек и озёр, разлагаются под действием бактерий (анаэробные микробиологические процессы), что приводит к уменьшению и даже полному удалению кислорода из воды. При этом образуются метан, сероводород и другие вредные соединения. В результате в воде создается «мертвая зона» [7]. Это позволяет сделать вывод, что это концентрация метана является одним из самых важных показателей для мониторинга экологической обстановки водоёма;

– датчик pH, позволяющий определять наличие выбросов с предприятий химической промышленности, обычно создающих нейтральную или кислотную среду (из-за того, что соединённая с атомом углерода

гидроксильная группа проявляет, как правило, кислотные свойства, а углеводороды в воде нерастворимы). Большинство рыб гибнут за пределами диапазона кислотности 5-9 [8], что делает необходимым изучать этот показатель с точки зрения воздействия предприятий органической химии на рыболовство. Кроме того, СанПин определяет допустимую кислотность воды в колодцах в пределах 6-9 [2], что также обуславливает необходимость использования прибора в данной среде;

- датчик минерализации, позволяющий измерить содержание неорганических загрязнителей (например, при производстве целлюлозы используют гидроксид натрия, гипохлорит натрия, дисульфиты кальция, магния, натрия или аммония, сульфид натрия[9], которые, будучи хорошо растворимыми в воде неорганическими веществами, являются сильными электролитами, почти полностью подвергаясь диссоциации на ионы, что делает возможным измерение неорганической минерализации раствора методом определения его электропроводности);

- датчик гидростатического давления, позволяющий использовать прибор в качестве профилографа, а также в целях учёта уровня воды в колодцах. В связи с тем, что давление атмосферы непостоянно и, например, с 26 по 29 апреля 2023 года атмосферное давление в Москве увеличилось на 11 мм рт. ст. [10], то есть на 15 ГПа (1500 Па), что соответствует слою воды в 0,15 м. Кроме того, при подъёме на 120 метров изменение высоты воздушного столба вызовет изменение атмосферного давления на ту же величину, что также вызовет искажение показателей;

- датчик температуры, позволяющий выявлять факты теплового загрязнения (одну из статей загрязнения человеком водоёмов являются сточные воды, температура которых в течение всего года не опускается ниже 10-15°C [11]) и изучать температурную стратификацию водных толщ (все водоёмы со стоячей водой делятся на моно-, поли-, олиго-, димиктические, т.е. испытывающие перемешивание вследствие, например, изменения плотности

воды из-за ее нагрева до $+4^{\circ}\text{C}$ [12], с определённой частотой, что влияет на экосистемы этих водоёмов).

1.3 Разработка программно-аппаратного комплекса

Аппаратная часть ПАК представлена блоком электроники, который должен включать в себя следующие компоненты:

- микроконтроллеры на каждом из модулей для снятия показаний с датчиков, отправки данных на устройство оператора;
- соединительного кабеля;
- датчики для снятия показаний на обеих частях.

Рассмотрим каждый компонент отдельно.

1.3.1 Выбор вычислительного элемента

К основному вычислительному элементу блока управления предъявляются следующие требования:

- поддержка последовательных интерфейсов UART и I²C– с целью осуществления надежной проводной связи на расстоянии 20 метров и снятия показаний с датчика давления;
- аналоговые входы для снятия показаний с датчиков;
- цифровые выходы для организации переменного питания датчиков минерализации и кислотности – в связи с тем, что оба подают напряжение на электроды, расположенные в водной среде, являющейся электролитом, в ходе испытаний были получены нулевые значения кислотности и минерализации при нахождении в воде двух датчиков сразу. В связи с этим встаёт вопрос организации включения-выключения этих датчиков для работы порознь.
- небольшой размер для удобства хранения, транспортировки и метания погружного модуля на большое расстояние;
- невысокая стоимость, так как прибор предполагается сделать доступным как для государственных организаций, так и для частных лиц;
- поддержка беспроводного соединения с устройством пользователя как наиболее удобного для снятия показаний на большом расстоянии, что

необходимо, например, при организации экологического мониторинга в колодцах.

Опираясь на дешевизну и уникальность в нише дешевых микроконтроллеров, обладающих возможностью беспроводного соединения семейства микроконтроллеров ESP было решено использовать самый дешёвый из них – ESP32 S2.

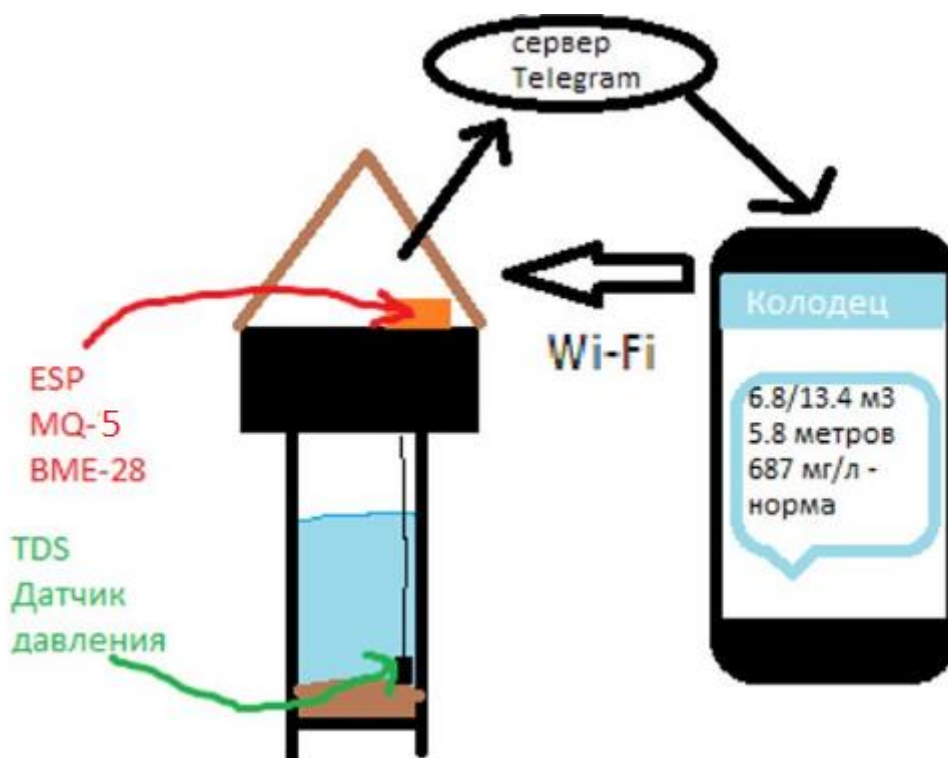


Рисунок 3 – Схема передачи данных

При передаче данных с погружного модуля на внешний было решено использовать четырёхжильную витую пару, оснащённую модулем RS485, осуществляющим связь по протоколу UART с целью обеспечить четкий сигнал на глубине в 20 метров.

Таким образом, основным вычислительным элементом блока управления аппарата являются две платы ESP32 S2 и подключенные к нему модули связи RS485.

1.3.2 Выбор датчиков для снятия показаний

Аппарат должен отслеживать следующие параметры внешней среды (объяснение, почему используется именно этот набор приборов, было приведено выше):

- pH;
- минерализация;
- температура воды;
- выделение органических газов;
- глубина.

После изучения рынка были выбраны следующие датчики:

- герметичный датчик давления;
- датчик концентрации солей на основе микросхемы LMC555;
- датчик органических газов MQ-5;
- герметичный датчик температуры воды Dallas18B20;
- датчик кислотности.



2. Конструкторская часть и программный комплекс

2.1 Определение общего вида и компоновки изделия

К разрабатываемому изделию предъявляются следующие основные требования (техническое задание):

- глубина погружения до 20 метров – абсолютное большинство озёр Московского региона имеют глубину ниже данной [14];

- небольшой размер (до 200 мм в длину);
- возможность снимать вышеуказанные показатели;
- возможность питаться как от АКБ (в случае аварийного отключения электричества или осуществления контроля водоёмов), так и от сети 220 В (автономный постоянный мониторинг качества и уровня воды в колодце)

на основе выдвинутых требований технического задания были определены основные конструктивные задачи:

- обеспечить герметичность основных сборочных узлов;
- разработать схему максимально компактного размещения электронных компонентов;

В ходе работы был разработан прототип аппарата, конструктивно состоящий из двух компонентов сборочных узлов:

- внешний модуль (рисунки 12 и 13);
- погружной модуль (рисунки 10 и 11), соединённый с внешним кабелем. Его небольшие размеры обеспечивают удобство хранения, транспортировки и использования как модуля экологического мониторинга, который может использоваться не только при непосредственном спуске с лодки, но и при изучении параметров с берега – для того, чтобы забросить модуль в водоём без применения технических средств, его габариты также подходят.

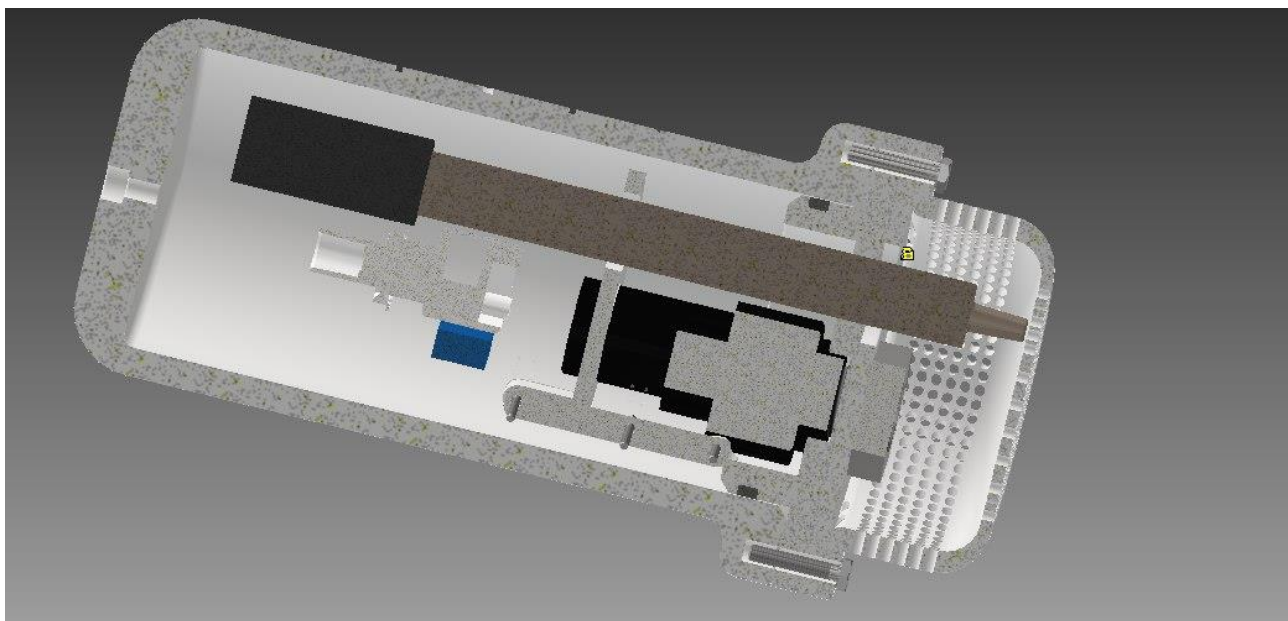


Рисунок 4. Компоновка погружного модуля

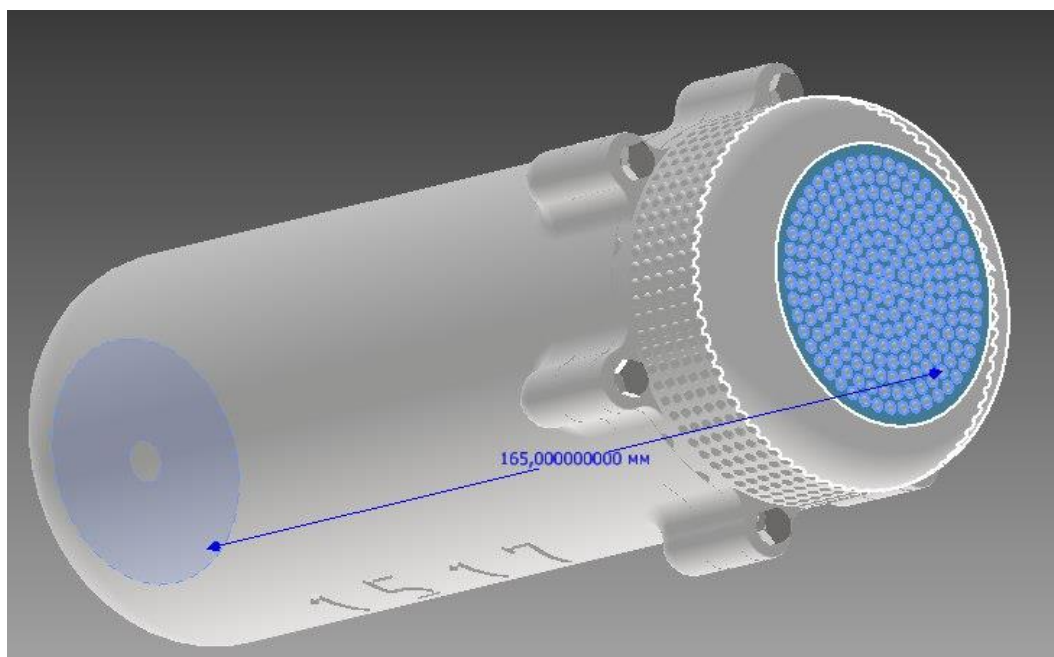


Рисунок 5. Сборка погружного модуля

Внешний модуль используется для организации электрического питания, снятия показаний концентрации органических газов и атмосферного давления, а также передачи показателей на устройство пользователя по беспроводной связи. Предусмотрены три крепления для болтов, гвоздей или троса для возможности надёжного закрепления в любых условиях.

Для того, чтобы изготовленное изделие было безопасным для окружающей среды, корпус изготовлен из фотополимерной смолы

трёхмерной печатью и последующим затвердеванием под действием ультрафиолетового излучения, а вместо клея предусмотрено магнитное крепление, имеющее также преимущество быстрой сборки-разборки. Помимо витой пары, для физического соединения с зондом используется металлический трос, закреплённый к нему на хомутах. Во избежание коррозии металлических элементов планируется использование эпоксидной смолы и крепление тросов на пластиковую крышку, так как при использовании металлических болтов может возникнуть коррозионный элемент.

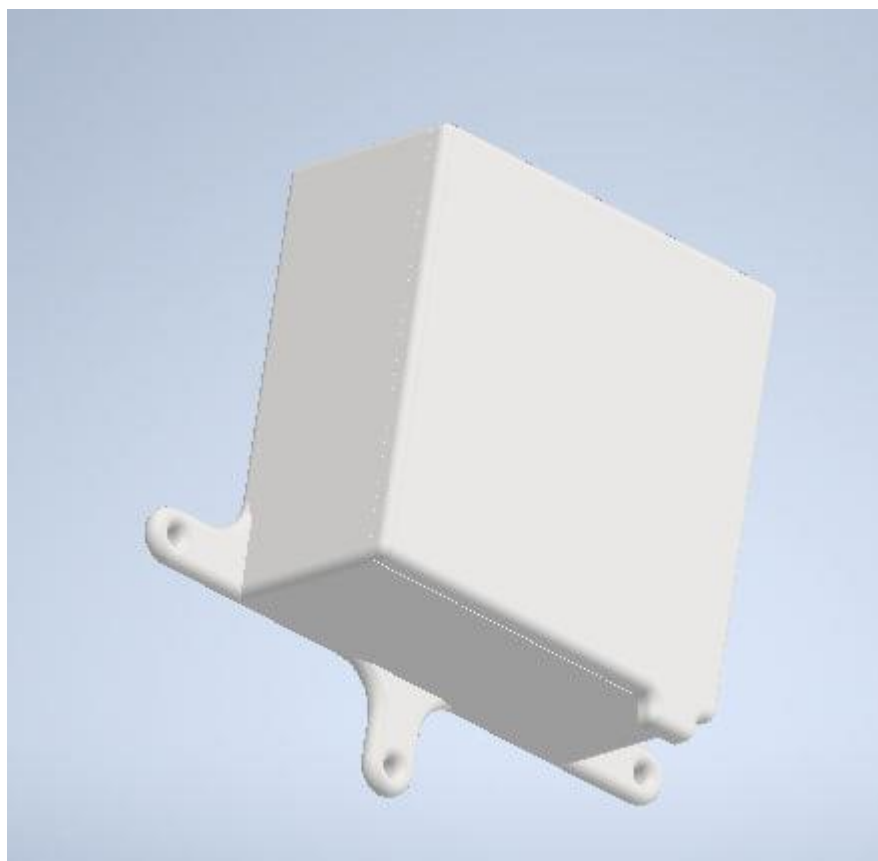


Рисунок 6 – Сборка внешнего модуля

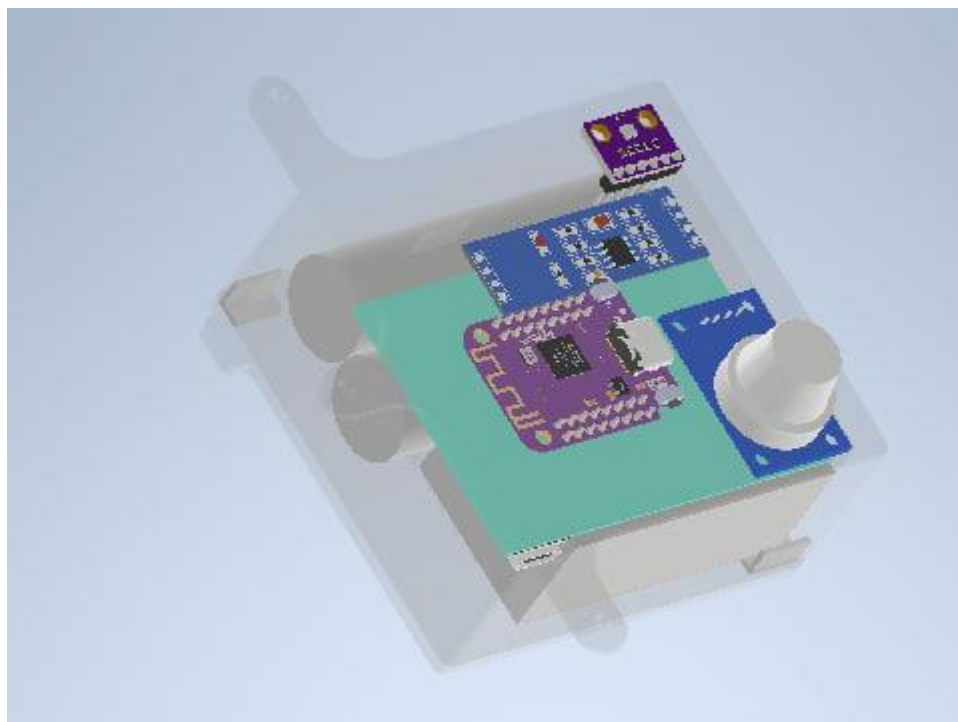


Рисунок 7 – Компоновка внешнего модуля

2.2 Создание изделия

Результатом проекта является законченное изделие – многофункциональный комплекс экологического мониторинга.

Большая часть спроектированных деталей изготовлено при помощи аддитивных технологий фотополимерной 3D печати. Детали, не требующие герметизации, печатаются с применением процентного заполнения – например, корпус внешнего модуля и кронштейны электроники погружного герметизации не требуют.

Для соединения защитной сетки, крышки и корпуса применяются втулки, вплавляемые в корпус.

2.3 Программный комплекс

Снятые с датчиков показания передаются на аналоговые входы вычислительного аппарата, после чего преобразуются в сообщение, передаваемое на внешний модуль с помощью UART-интерфейса по кабелю, который передает их на сервер с привязкой ко времени и добавлением показателя концентрации метана. С сервера информация передаётся в

телеграм-бот пользователя, где он может оперативно контролировать информацию с привязкой ко времени с помощью анализа графиков и числовых значений.

В процессе работы над изделием выяснилось, что одновременная работа датчиков кислотности и минерализации в водной среде, являющейся проводником, вызывает короткое замыкание, что обусловило создание функции, отвечающей за поочерёдное питание вышеуказанных датчиков.

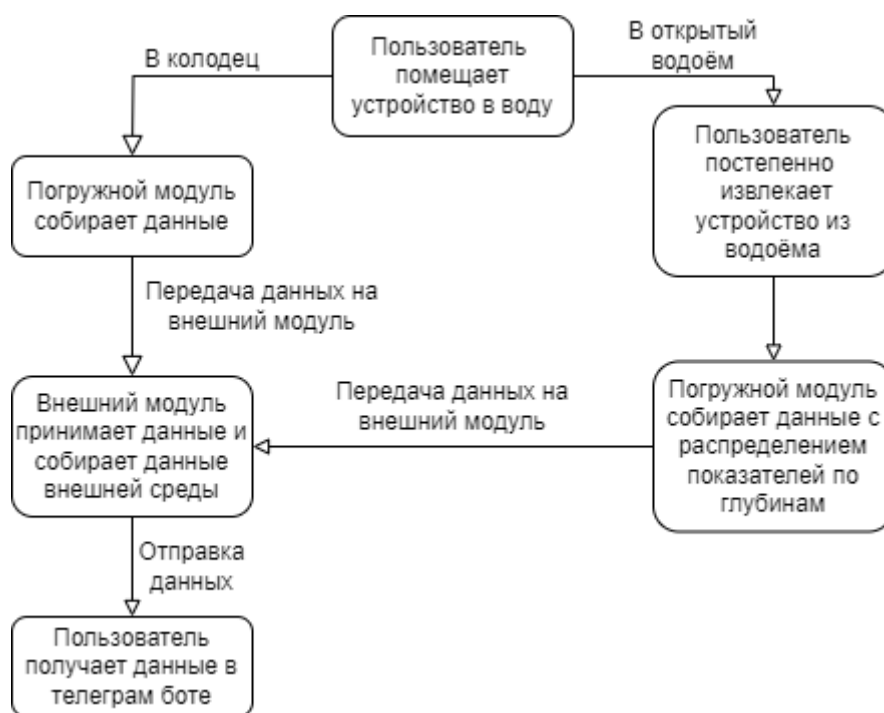
3. Использование изделия и целевая аудитория

Организации экологического и гидрологического мониторинга, осуществляющие надзор за экологической обстановкой водной среды водоёмов, могут быть заинтересованы в изучении изменения последствий химического и теплового загрязнения в зависимости от глубины; рыболовные хозяйства заинтересованы в благоприятной экологической обстановке водоёма, из которого добываются рыбные ресурсы; лица, получающие воду из колодцев, так как наличие датчика давления воды позволяет помимо качества отслеживать колебания уровня воды с целью планирования её потребления.

3.1 Алгоритм работы устройства

В колодце размещается погружной модуль, над шахтой на болтах или тросах размещается внешний. Через WiFi устанавливается связь между мобильным устройством пользователя и внешним модулем, при превышении уровня загрязнения или небольшом количестве воды отправляется соответствующее уведомление.

В случае мониторинга состояния водоёмов также осуществляется связь с пользователем через WiFi, погружной модуль на тросе опускается в водоём или забрасывается туда с берега, затем медленно извлекается с целью снятия показаний и изучения корреляции с глубиной погружения в момент их снятия.



ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе работы были определены основные тактико-технические характеристики и форм-фактор комплекса:

- глубина погружения до 20 метров;
- беспроводная передача данных;
- осуществления отслеживания параметров внешней среды, таких

как температура, минерализация, глубина, выделение органических газов, pH.

В работе проведён анализ существующих аппаратов, выделены и классифицированы основные типы, определен характер выполняемых задач.

По результатам выполнения проектно–конструкторской работы был разработан прототип комплекса мониторинга экологической обстановки водных объектов, находящихся под угрозой загрязнения предприятиями химической промышленности (что соответствует заявленной цели работы), конструктивно состоящий из двух модулей – внешнего и погружного с применением моделирования сборки в САПР Autodesk Inventor.

Детали напечатаны на фотополимерном принтере, ведётся сборка корпуса и внесение доработок в чертежи проекта на основании недочётов,

выявленных в результате процесса работы с произведенными комплектующими.

В среде программного обеспечения Arduino IDE ведётся разработка программно-аппаратного комплекса.

Проведен ряд полевых испытаний: в одном из колодцев на западе Подмосковья выделяются органические газы, что говорит об анаэробном разложении органических веществ (рисунок 8).

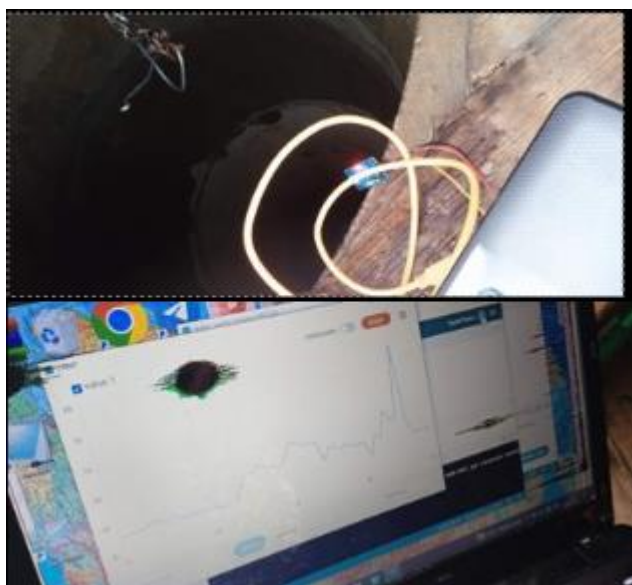


Рисунок 8 – полевые исследования, выявившие повышенное содержание горючих газов в шахте колодца

В результате изучения космических снимков была получена информация о расположении отвала одного из подмосковных химических комбинатов в опасной близости от водоёма (рисунок 9).



Рисунок 9 - Отвалы химического комбината г. Рошаль Московской области

Основными перспективами развития являются:

- сборка рабочего прототипа;
- испытания в реальных условиях;
- расширение оснащения датчиками;
- добавление возможности отбора проб заборной воды на заданной

глубине для более детального анализа, для чего в конструкции предусмотрено свободное пространство, место которого без перекомпоновки может занять сервопривод и шприц, которые будут использоваться как батометр.

Список использованной литературы

1. Газета "Коммерсантъ С-Петербург" №43 от 13.03.2001, стр. 2 URL: <https://www.kommersant.ru/doc/562028>
2. СанПиН 2.1.4.1175-02
3. Зекцер И. С. Подземные воды России // Большая российская энциклопедия: научно-образовательный портал – URL: <https://bigenc.ru/c/rossiia-priroda-podzemnye-vody-82f172/?v=7347404>. – Дата публикации: 26.05.2023
4. URL: <https://datchiki.com/product/ctd-zond-gidrometrika-505-utp/> Дата обращения: 19.01.2024

5. URL:<https://datchiki.com/product/aquaread-ap-700-nabor-dlya-operativnogo-monitoringa/> Дата обращения: 19.01.2024
6. В. Г. Дебабов Биогаз // Большая российская энциклопедия: научно-образовательный портал – URL: <https://bigenc.ru/c/biogaz-b25c25/?v=7606900>. – Дата публикации: 23.06.2023
7. Краткий курс лекций по гидробиологии: учебное пособие для студентов-бакалавров биологических направлений / сост. В.В. Леонтьев. – Елабуга: Изд-во Елабуж. ин-та К(П)ФУ. – с.71
8. Краткий курс лекций по гидробиологии: учебное пособие для студентов-бакалавров биологических направлений / сост. В.В. Леонтьев. – Елабуга: Изд-во Елабуж. ин-та К(П)ФУ. – с.15
9. Усов А. И. ЦЕЛЛЮЛОЗА // Большая российская энциклопедия. Электронная версия (2017); <https://old.bigenc.ru/biology/text/4674384> Дата обращения: 19.01.2024
10. URL: <https://www.gismeteo.ru/diary/4368/2023/4/> Дата обращения: 7 февраля 2024 г.
11. Краткий курс лекций по гидробиологии: учебное пособие для студентов-бакалавров биологических направлений / сост. В.В. Леонтьев. – Елабуга: Изд-во Елабуж. ин-та К(П)ФУ. – с.45
12. Краткий курс лекций по гидробиологии: учебное пособие для студентов-бакалавров биологических направлений / сост. В.В. Леонтьев. – Елабуга: Изд-во Елабуж. ин-та К(П)ФУ. – с.51