

Всероссийский конкурс исследовательских и проектных работ  
школьников «Высший пилотаж»

**Исследование и разработка автономного гидрофизического зонда как перспективного  
средства оперативной океанологии**

Проект

Направление *«Технические и инженерные науки»*

Авторы: Нагорская Таисия Станиславовна,  
учащаяся 11 «И» класса,  
ГБОУ города Москвы «Школа № 1517»  
Еремихина Мария Глебовна,  
учащаяся 11 «И» класса,  
ГБОУ города Москвы «Школа № 1517»  
Быков Антон Павлович,  
учащийся 11 «И» класса,  
ГБОУ города Москвы «Школа № 1517»

Научные руководители: Смирнов Иван Алексеевич  
Ткаченко Артем Алексеевич  
Худайдатова Роза Рафисовна

2024 г.

## АННОТАЦИЯ

Объектом исследования является распределенная сеть мониторинга подводной обстановки. Предмет исследования — сеть подводных гидрофизических зондов как средство оперативной океанологии (ОО).

Цель проекта — исследование и разработка автономного гидрофизического зонда как перспективного средства оперативной океанологии.

Изменение климата, постепенное повышение уровня океана и увеличение риска возникновения экстремальных погодных явлений и катастроф привели к необходимости развития оперативных систем мониторинга за акваториями и улучшения технологий и методов прогнозирования.

В ходе исследовательской части работы был проведен сравнительный анализ устройств, применяемых для мониторинга акваторий, в результате которого было выявлено, что одной из наиболее перспективных систем ОО является сеть дрейфующих профилирующих зондов.

Анализ отечественных систем мониторинга показал, что российские разработки значительно уступают зарубежным, таким образом, на основе данных об использовании дрейфующих профилирующих буев как перспективного средства ОО и необходимости разработки отечественной системы мониторинга было принято решение о создании сети подводных автономных дрейфующих зондов для сбора гидрофизических данных о среде.

В результате конструкторской части была разработана 3D-модель устройства в программе Autodesk Inventor Professional, на основе которой были проведены гидродинамический и прочностной расчеты в пакете САПР Solidworks для моделирования параметров зонда.

В ходе работы над программно-аппаратным комплексом был создан MQTT-сервер для передачи данных с зонда на компьютер оператора для их последующей обработки. Также была разработана MESH-сеть для оптимизации времени передачи собранной с зонда информации на сервер. Для транслирования полученных показателей о среде было принято решение создать пользовательский интерфейс оператора для обмена данными с разработанным изделием и предоставляющий пользователю возможность получить общую информацию об устройстве.

В результате схмотехнической части был проведен подбор электронно-компонентной базы для обеспечения требуемого функционала устройства. На основе параметров питания изделия, таких как емкость, напряжение и токоотдача, был разработан и протестирован блок

аккумуляторных батарей. Также с целью обеспечения удобства размещения всей электронной составляющей устройства были созданы печатных плат.

В результате проведения стендовых испытаний в бассейне были проверены герметичность и остойчивость разрабатываемого устройства. Для тестирования корректности работы программного кода также были проведены натурные испытания на открытой акватории, в результате которых прототип успешно отработал 20 циклов: оператор отправлял сигнал для запуска через сервер, за счет работы балластной системы устройство погружалось, параллельно получая информацию о свойствах среды с датчиков, а после всплытия пакет собранных данных отправлялся на компьютер оператора.

В результате проекта был разработан и собран автономный гидрофизический зонд.

## СОДЕРЖАНИЕ

АННОТАЦИЯ.....	2
СПИСОК ОБОЗНАЧЕНИЙ И СОКРАЩЕНИЙ .....	6
ВВЕДЕНИЕ.....	7
1. ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ .....	11
1.1 Общие сведения об оперативной океанологии .....	11
1.2 Анализ применяемых систем оперативной океанологии.....	11
1.2.1 Донные станции.....	12
1.2.2 Автономные необитаемые подводные аппараты .....	15
1.2.4 Автономные буйковые станции.....	17
1.2.5 Буи-дрифтеры .....	19
1.2.6 Профилирующие буи .....	23
1.2.5 Современный уровень развития отечественной оперативной океанологии .....	26
1.2.6 Выводы по разделу.....	36
1.4 Предлагаемое решение .....	40
1.5 Целевая аудитория .....	41
1.5 Моделирование параметров изделия.....	45
1.5.1 Гидродинамический расчет.....	45
1.5.2 Прочностной расчет .....	55
2. КОНСТРУКТОРСКАЯ ЧАСТЬ .....	65
2.1 Определение общего вида и компоновки изделия.....	65
2.1.1 Эскизный проект .....	65
2.1.2 Разработка корпуса .....	66
2.1.3 Разработка системы изменения плавучести .....	67
2.1.4 Разработка аккумуляторной кислотной батареи .....	72
2.1.5 Разработка блока электроники.....	75
2.1.6 Разработки универсальных стыковочных элементов .....	76
2.1.7 Генеративное моделирование .....	79
2.2 Прототипирование .....	82
2.2.1 3D-печать .....	82
2.2.2 Изготовление свинцовых грузов.....	84
3. СХЕМОТЕХНИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ .....	89
3.1 Определение компонентной базы.....	89
3.2 Разработка печатных плат .....	93
3.2.1 Разработка процессорной печатной платы .....	94
3.2.1.1 Создание схемы электрической принципиальной (ЭЗ).....	94
3.2.1.2 Компоновка процессорной печатной платы .....	95
3.2.1.3 Трассировка процессорной печатной платы .....	99
3.2.2 Разработка печатной платы для присоединения датчиков.....	102
3.2.2.1 Создание схемы электрической принципиальной (ЭЗ).....	102
3.2.2.2 Компоновка печатной платы для присоединения датчиков .....	104
3.2.2.3 Трассировка печатной платы для присоединения датчиков.....	105

3.2.3 Создание схемы электрической соединений (монтажная, Э4).....	106
3.2.4 Создание документации для производства и монтажа печатной платы.....	106
4. РАЗРАБОТКА ПРОГРАММНО-АППАРАТНОГО КОМПЛЕКСА .....	108
4.1 Создание плана программного обеспечения для управления сетью подводных профилирующих зондов .....	108
4.1.1 Изучение протокола MQTT.....	108
4.1.2 Создание MESH-сети .....	110
4.1.3 Разработка бизнес-логики системы .....	111
4.2 Парадигмы программирования .....	113
4.2.1 Декларативное программирование.....	113
4.2.2 Императивное программирование.....	119
5. ПРОВЕДЕНИЕ ИСПЫТАНИЙ .....	119
5.3 Проведение стендовых испытаний.....	119
5.4 Проведение полигонных испытаний.....	120
ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....	136
СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ.....	137
ПРИЛОЖЕНИЕ А .....	141
Расчет себестоимости устройства.....	141
ПРИЛОЖЕНИЕ Б.....	144
Материалы проекта .....	144

## СПИСОК ОБОЗНАЧЕНИЙ И СОКРАЩЕНИЙ

АБС — автономная буйковая станция

АКБ — аккумуляторная кислотная батарея

АНПА — автономный необитаемый подводный аппарат

БС — балластная система

ДВНИГМИ — Дальневосточный научно-исследовательский гидрометеорологический институт

ИОРАН — Институт океанологии им. П.П. Ширшова Российской академии наук

ОКБ ОТ РАН — Опытное-конструкторское бюро океанологической техники Российской академии наук

ОО — оперативная океанология

ПАГИС — позиционная автономная гидрофизическая измерительная станция

СИП — система изменения плавучести

СУ — система управления

MQTT-сервер — упрощенный сетевой протокол, работающий поверх TCP/IP, ориентированный на обмен сообщениями между устройствами по принципу «издатель — подписчик»

MESH-сеть — это распределенная, одноранговая, ячеистая сеть, каждый узел в которой обладает такими же полномочиями, как и все остальные

OTA — обновление основного микроконтроллера по воздуху

## ВВЕДЕНИЕ

В последние годы человечество все больше обеспокоено глобальным изменением климата и его региональными последствиями. Уровень моря повышается со скоростью 3,7 мм в год, ледяной покров Арктики сокращается, а районы высоких широт быстро нагреваются. Экстремальные погодные явления приводят к гибели людей. Кроме того, 9 из 10 самых теплых лет с 1880 года приходятся на 21 век [1].

Эти эффекты вызваны сочетанием долгосрочного изменения климата и естественной изменчивости. Их воздействие могут иметь как позитивные (увеличение вегетационного периода, открытие арктических судоходных путей), так и негативные последствия (прибрежные наводнения, сильные засухи, экстремальные и частые тепловые волны и погодные явления).

Более 90% избыточного тепла, поглощаемого Землей с 1970-х годов, сохраняется в океанах. Это связано с высокой теплоемкостью воды по сравнению с воздухом, большим объемом океана и его способностью переносить тепло с поверхности в его глубины. В результате океан, особенно его внутренняя часть, где краткосрочные колебания температуры от суточной до месячной невелики, идеально подходит для выявления долгосрочных тенденций потепления в нашей климатической системе. На рисунке 1 показаны данные о температуре, усредненные по мировому океану на глубине до 1900 метров с 2004 года. В то время как температура в верхних слоях колеблется в связи с краткосрочными климатическими явлениями, в более глубоких водах наблюдается постоянная тенденция к потеплению. Таким образом, эти данные указывают на общее потепление климата Земли.

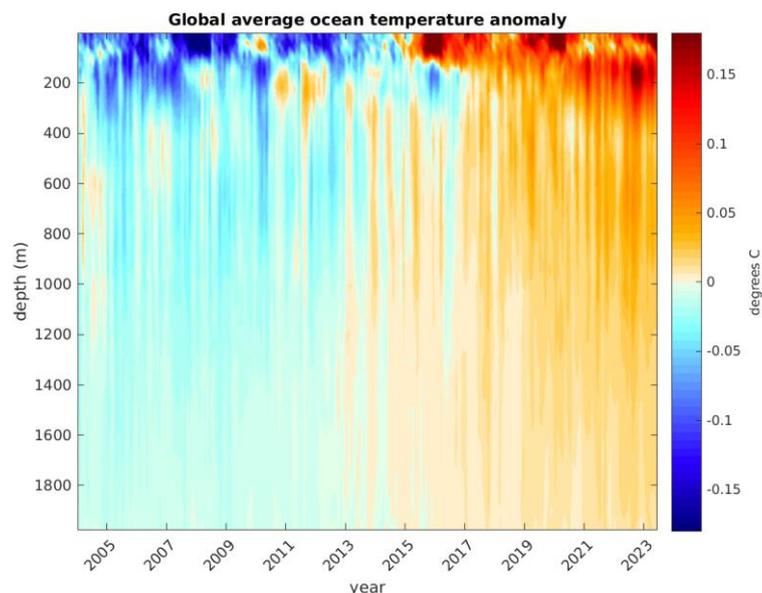
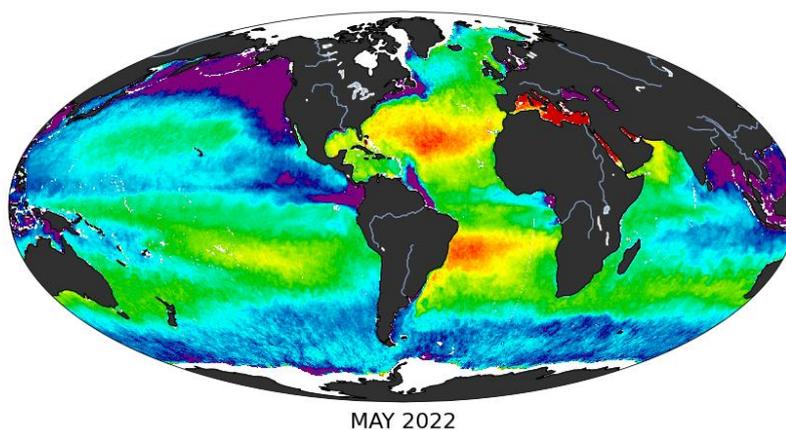
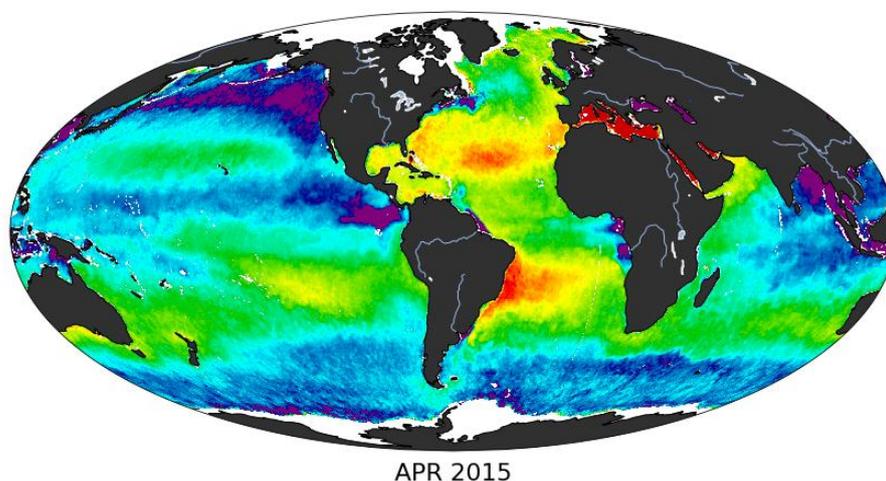


Рисунок 1 — Средняя температура океана

Кроме того, поверхность океана является хорошим местом для наблюдения за гидрологическим циклом (процесс циклического перемещения воды в земной биосфере, который включает в себя испарение воды, перенос паров воздушными течениями, их конденсацию, выпадение в виде осадков и перенос воды реками и другими водными объектами), поскольку соленость поверхности моря отражает локальный баланс испарения, которое ее увеличивает, и осадков, которые ее уменьшают. На рисунке 2 показаны данные о солености поверхности моря на апрель 2015 года и май 2022 года [2], которые показывают отчетливое уменьшение содержания солей в воде в пресных районах и его увеличение в районах с высокими показателями параметра.



## Рисунок 2 — Соленость поверхности моря на апрель 2015 года и май 2022 года

В то же время в современном мире глобализация деятельности приводит к увеличению зависимости экономики от различных природных явлений. Антропогенное воздействие на окружающую среду становится все более значительным, вызывая нарушение естественного равновесия природных процессов и повышение негативных последствий для человека. Влияние человеческой деятельности также приводит к существенным изменениям морских экосистем [3].

Результаты человеческой деятельности приводят к уменьшению разнообразия морской фауны и улова рыбы. Эксплуатация шельфа для добычи нефти и газа увеличивает вероятность возникновения крупных катастроф, которые негативно влияют на морские биологические и рекреационные ресурсы. В связи с этим интенсивное использование океана должно сопровождаться улучшением системы мониторинга морской среды. Надежная информация помогает избежать катастроф и оптимизировать производственные издержки, а умение прогнозировать состояние морской среды позволяет увеличить эффективность операций на море и предотвратить отрицательные последствия хозяйственной деятельности.

В ответ на запросы потребителей, связанные с использованием морских ресурсов, наблюдается тенденция развития систем оперативных наблюдений и прогнозов. Исследования в этой области составляют основу оперативной океанологии.

Начиная с 1980-х годов, в нашей стране началась работа по созданию научной базы для практической реализации методов оперативной океанологии, однако ситуация 1990-х на десятилетия отодвинула решение проблемы создания подобных систем. До сих пор эта проблема не решена на государственном уровне, что приводит к тому, что развитие российских систем мониторинга значительно уступает зарубежным. Кроме того, многие наработки связаны с использованием импортной техники, а попытки разработки собственных систем оперативной океанологии, предпринятые в последние годы, сталкиваются с трудностями научно-технического и методологического характера [4].

Таким образом, была выявлена необходимость разработки отечественных систем ОО, которые позволят преодолеть импортозависимость России в данной области, а также будут способствовать защите национальных интересов РФ, изучению обширных морских акваторий страны и развитию фундаментальной океанологической науки.

Целью проекта является исследование и разработка автономного гидрофизического зонда как перспективного средства оперативной океанологии.

Поставленная в проекте цель достигается выполнением следующих задач:

- провести анализ современного уровня развития отечественных и зарубежных систем ОО;
- обосновать целесообразность и применимость предлагаемого технического решения;
- разработать концепт устройства;
- спроектировать систему ОО;
- разработать и создать прототип;
- провести стендовые и натурные испытания.

В работе над проектом принимали участие: Нагорская Таисия — конструктор, Еремихина Мария — программист, Быков Антон — схемотехник.

Конструктор выполняет следующие задачи:

- разработка 3D-модели устройства;
- проведение прочностного и гидродинамического расчетов;
- изготовление прототипа устройства;
- сборка и герметизация изделия.

Программист выполняет следующие задачи:

- создание модуля для связи потребителя с аппаратом;
- создание распределенной сети для связи устройств сети между собой;
- разработка программного комплекса для управления сетью.

Электронщик выполняет следующие задачи:

- подбор электронно-компонентной базы;
- разработка и создание печатных плат.

# 1. ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

## 1.1 Общие сведения об оперативной океанологии

Изменение климата, увеличение риска возникновения экстремальных погодных явлений и катастроф, а также повышение уровня океана привели к необходимости разработки оперативных систем наблюдения за акваториями и улучшения технологий и методов прогнозирования. В связи с этим в последние два десятилетия наблюдается тенденция постепенного перехода от преимущественно экспедиционных методов изучения Мирового океана и обширных акваторий с помощью научно-исследовательских судов и спутниковых наблюдений к созданию систем ОО.

Задачи ОО включают в себя моделирование динамики вод, создание непрерывных систем мониторинга, оперативная передача данных и усвоение их прогностическими моделями, а также хранение, обработку и визуализацию данных наблюдений.

Важными результатами, получаемыми благодаря ОО, являются [5]:

- текущие прогнозы, предоставляющие наиболее точную информацию о текущем состоянии моря;
- максимально долгосрочные прогнозы, обеспечивающие непрерывные сведения о будущем состоянии моря;
- ретроспективные прогнозы, объединяющие многолетние ряды данных, которые дают возможность выявлять тенденции в изменении климата.

Практические задачи, которые несет ОО для человека:

- совершенствование методов прогнозирования;
- повышение уровня научных океанологических исследований;
- создание информационной базы, необходимой для рационального и безопасного использования морской окружающей среды, эффективного управления ресурсами моря;
- предотвращение негативные последствия хозяйственной деятельности;

## 1.2 Анализ применяемых систем оперативной океанологии

Россия и другие мировые государства обладают системами ОО, в совокупности выполняющих функции по наблюдению за состоянием Мирового океана. К таким системам можно отнести:

- донные станции;
- автономные обитаемые подводные аппараты (АНПА);
- автономные буйковые станции (АБС);
- буи-дрифтеры;
- профилирующие буи.

Рассмотрим подробнее каждую из перечисленных систем

### 1.2.1 Донные станции

Донные геофизические обсерватории позволяют непрерывно измерять и регистрировать различные параметры, характеризующие состояние придонного слоя воды и донных осадков, скорость и направление течений, уровень водной поверхности, а также регистрировать сигналы от удаленных источников, таких как сейсмические, акустические, электромагнитные. Донные обсерватории могут использоваться как для изучения естественной изменчивости океанической среды, так и для оценки антропогенного воздействия в районах интенсивной промышленной деятельности [6].

Обсерватории, используемых в фундаментальных научных исследованиях, способны измерять множество параметров с заданной периодичностью, выполнять автоматический анализ и обработку данных. Программы их функционирования могут автоматически меняться в зависимости от результатов измерений.

Для донных обсерваторий наиболее удобным средством связи является подводный кабель. Важным преимуществом его использования является возможность обеспечение непрерывного электропитания, что увеличивает время эксплуатации устройства до нескольких лет. Однако когда речь идет о расстоянии в десятки километров и более до пункта управления, стоимость подводных кабелей значительно превышает стоимость самих обсерваторий. Для оперативной передачи данных с донных станций могут использоваться всплывающие модули со связью через спутниковый или радиоканал. Однако такие модули обеспечивают только разовую связь и не позволяют передавать команды управления на донную станцию. Эффективным

решением задачи оперативной связи с автономной донной обсерваторией является использование ретрансляционного буйа. Такая система обеспечивает передачу данных и команд управления по цифровому радиоканалу с возможностью многократного повторения связи. Тем не менее, использование ретрансляционного буйа существенно сокращает время автономной работы устройства до нескольких месяцев.

Пример донной обсерватории представлен на рисунке 3.

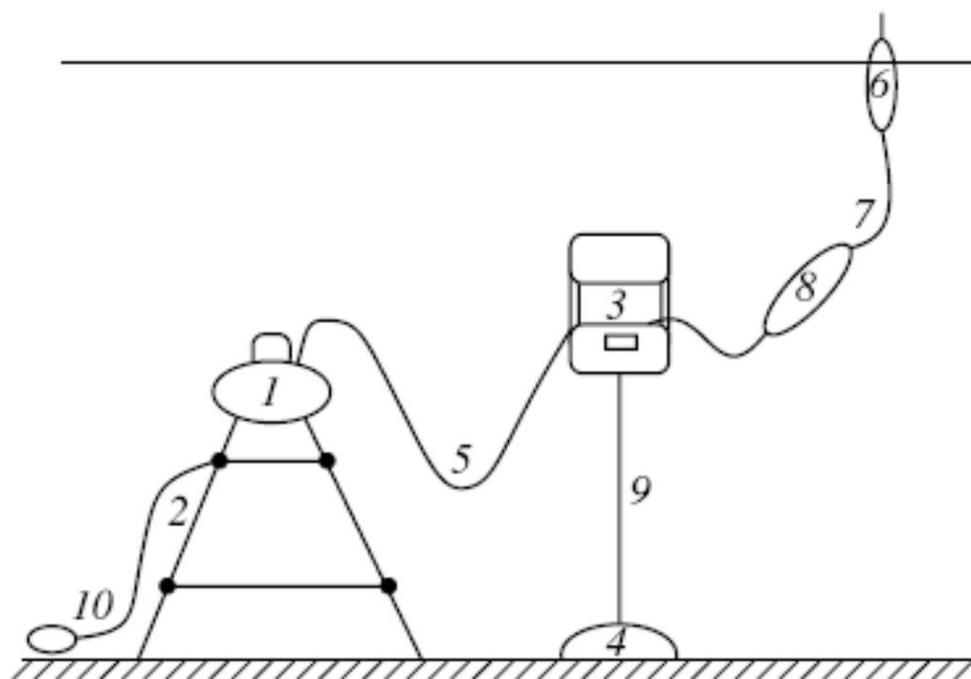


Рисунок 3 — Функциональная схема донной обсерватории

1 — приборный донный комплекс; 2 — треногаоснование; 3 — притопленный буй; 4 — якорь; 5, 7 — кабель-трос; 6 — всплывающий радиоретрансляционный буй; 8 — выюшка-противовес; 9 — буй-реп; 10 — аварийный трос

К недостаткам донных станций как систем ОО можно отнести их статичность. Этот фактор затрудняет развертывание сети обсерваторий (в том числе благодаря относительной сложности установки и демонтажа), необходимой для исследования обширных акваторий.

Примерами использования донных станций с кабельной сетью передачи данных служат Гавайская морская сейсмологическая обсерватория HUGO-2 (США) [7], японский сейсмологический комплекс в районе Южно-Курильского желоба [8] и программа создания донных кабельных обсерваторий в Японии 20 POSEIDON [9].

В Греции проект использования донной станции в экологических целях реализуется в заливе Патры [10]. Обсерватория расположена на глубине 42 м и предназначена для непрерывных и продолжительных измерений концентрации метана в морской воде вблизи дна. Донная обсерватория соединена с наземным пунктом наблюдения кабелем.

Еще одним примером использования данного вида системы ОО служит экологическая подводная обсерватория (PLUTO - Panama LJI Underwater Tropical Observatory), размещенная на глубине в 20 м, в 1,5 км от тихоокеанского побережья Панамы [11]. Обсерватория выполняет ряд задач в сфере океанологических исследований по оценке влияния изменений параметров морской среды на развитие микроорганизмов.

Таким образом, донные обсерватория для изучения гидрофизических данных о среде обладают следующими преимуществами:

- широкий спектр направлений исследований: донная сейсмология, геомагнетизм, геодезия, физическая океанография.
- возможность установки большого количества приборов для измерения гидрофизических параметров: широкополосный сейсмограф, измеритель уровня поверхности океана, распределенная гидроакустическая антенна, измеритель электрического потенциала, магнитометры постоянного и переменного полей, измерители течений, температуры и электропроводности воды. Также обсерватории могут быть оснащены видеокамерой;
- относительно высокая автономность при использовании подводного кабеля (около 10 лет);
- возможность оперативной связи с помощью ретрансляционного буйя или подводного кабеля.

Однако донные обсерватории плохо пригодны для создания системы оперативной разведки и наблюдения по ряду причин:

- относительная сложность установки и демонтажа;
- отсутствие возможности снимать профили гидрофизических параметров;
- наличие линии связи как ограничивающего фактора по дальности размещения (при отсутствии ретрансляционного буйя);
- статичность;

- относительно низкая автономность при использовании ретрансляционного буя (4-6 месяцев).

### 1.2.2 Автономные необитаемые подводные аппараты

В настоящее время все чаще для мониторинга акваторий применяют АНПА высокой автономности — глайдеры, которые перемещаются по специальной «пилообразной» траектории в заданном диапазоне глубин за счет изменения плавучести (см. рис. 4).

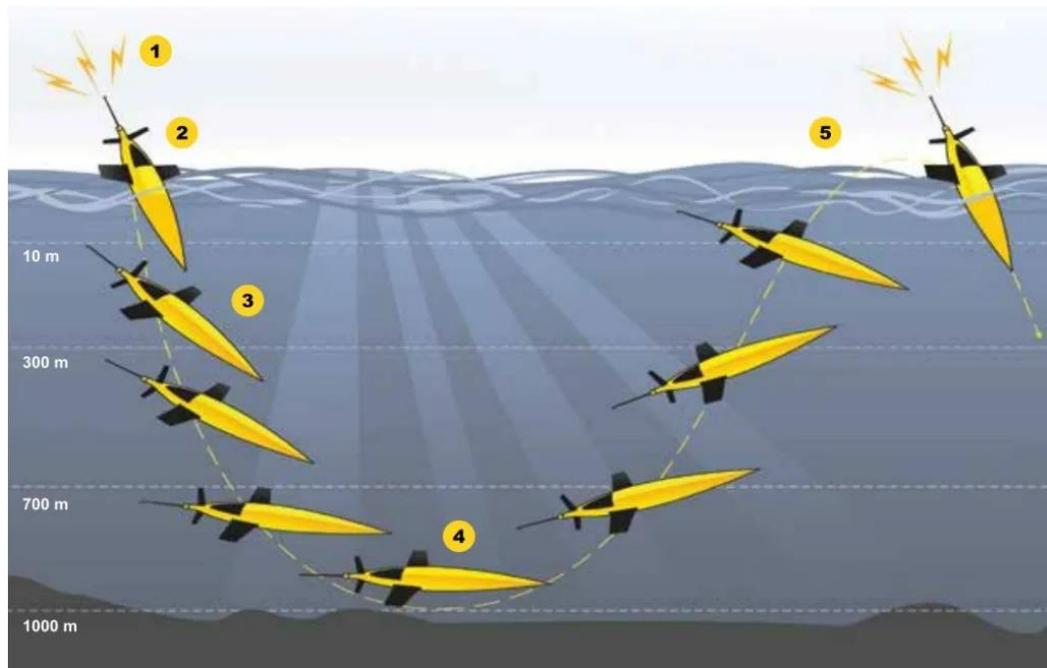


Рисунок 4 — Траектория движения глайдеров

Глайдеры представляют собой универсальный инструмент для изучения любых акваторий Мирового океана, включая Арктическую зону, при этом подводный аппарат способен нести на борту достаточное количество полезной нагрузки в виде различного рода датчиков и зондов. Современные способы применения робототехнических комплексов, таких как группы глайдеров, также позволяют организовывать автоматизированные сети океанографических измерений [12].

Одним из направлений развития данной концепции использования глайдеров как средства ОО стала инициативная межгосударственная работа The Everyone's Gliding Observatories (EGO) [13]. Впоследствии эта работа стала частью европейского проекта Gliders for Research, Ocean Observation and Management (GROOM), который направлен на использование групп глайдеров для сбора океанографических данных. Совместно с проектом Европейской комиссии Coriolis, исследователями было проанализировано большое количество данных, включая

информацию о температуре, электропроводности, давлении и массовой концентрации хлорофилла в морской воде

В настоящее время в мире для исследовательских миссий применяется более чем 400 глайдеров (около 250 глайдеров – на территории США, 100 – в Европе, 50 – в Китае, 30 – в Австралии, 30 – в Канаде, 9 – в Мексике и Южной Корее, по 3 в Израиле и Перу, по 2 в Новой Зеландии, Индии и Тайване). Распределение АНПА в сети по состоянию на декабрь 2023 г. показано на рисунке 5 [14]. На схеме можно заметить, что в международной практике глайдеры в основном используются в прибрежных акваториях. Причиной этому может быть относительная низкая автономность устройств (4-8 месяцев) и сложная система автоматического управления.



Рисунок 5 — Расположение глайдеров в глобальной сети по состоянию на декабрь 2023 г.

Таким образом, использование АНПА обладает следующим рядом преимуществ:

- использование в широком коридоре глубин (до 6000 м);
- сбор и передача информации в центр обработки в масштабе времени близком к реальному;
- возможность оперативной корректировки программного задания миссии при сеансе связи;
- относительно низкая стоимость производства и эксплуатации – не требует судна обеспечения, простая транспортировка, легкость развертывания системы.

Однако глайдеры, применяемые для создания системы ОО и наблюдения, обладают следующими недостатками:

- необходимость создания сложных систем автоматического управления и систем точной дифферентовки и изменения угла крена;
- сложность покрытия значительные по площадям акватории;
- относительно низкая автономность (4-8 месяцев).

#### 1.2.4 Автономные буйковые станции

Автономные буйковые станции (АБС) и поверхностные буи, на которых располагаются различные метеорологические и океанологические приборы, служат для исследования гидрофизических параметров в приповерхностном слое океана. Такие станции характеризуются простой конструкцией и невысокой стоимостью. Примеры автономных буйковых станций представлены на рисунке 6.

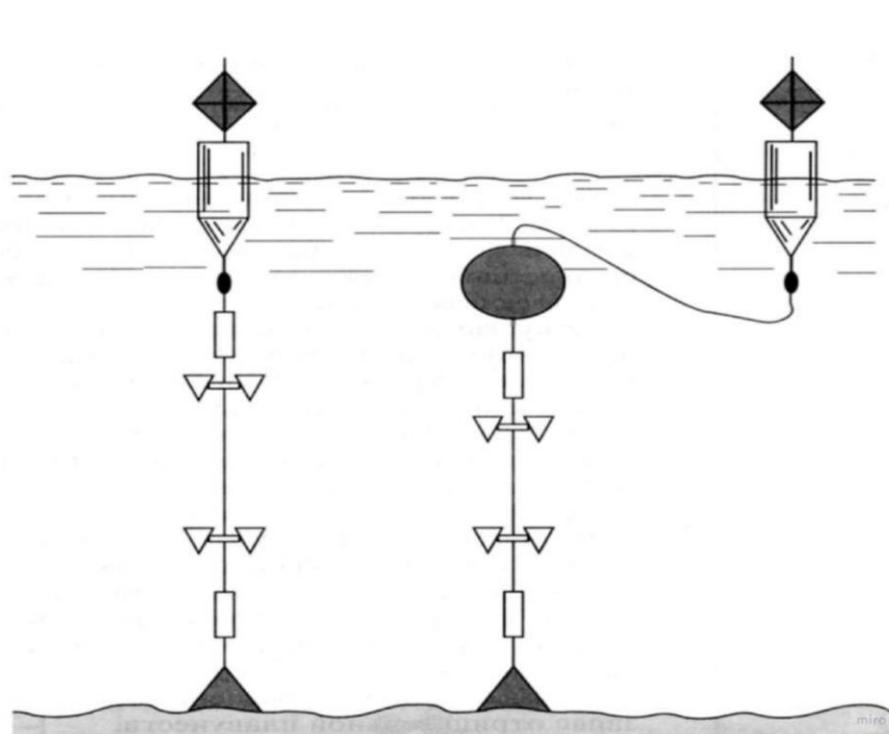


Рисунок 6 — Примеры автономных буйковых станций с поверхностным буюм (слева) и с несущим притопленным и маркировочным поверхностным буюм (справа)

Примером АБС являются буи Seawatch, разработанные нидерландской компания Fugro [15]. Мониторинговые системы, использующие буи Seawatch (см. рис. 7) различных

конфигураций, позволяют собирать обширные данные в прибрежных зонах по всему миру от Арктики до тропиков.



Рисунок 7 — ABC Seawatch нидерландской компания Fugro

В качестве примера использования АБС можно также привести систему мониторинга Кувейта [16], которая включает в себя несколько заякоренных буёв, установленных вдоль береговой линии и проводящих измерения скорости и направления ветра, температуры воздуха, относительной влажности, атмосферного давления, наличия нефтепродуктов в приповерхностном слое воды, концентрации растворенного кислорода, скорости и направления течения, содержания хлорофилла, температуры и солености воды, кислотности, вертикального перемещения, прозрачности и цветения воды, а также содержания тяжелых металлов, концентрации нитратов.

Сложности, связанные с использованием данного метода наблюдения, включают необходимость достаточно точного предварительного расчета длины буйрепа и связанной с этим точной привязки к району постановки. Установка таких станций в районах с значительным уклоном дна затруднена, так как определение глубины погружения якоря-груза становится трудной и неопределенной задачей даже при проведении тщательных измерений. Кроме того, точный расчет длины буйрепа для АБС часто невозможен из-за сложности предварительной оценки силы и характера течений, ветровых и волновых особенностей в месте постановки. По этой причине такие станции подвержены повышенному риску потери из-за обрыва буйрепов, подвергающихся непрерывному воздействию динамических переменных нагрузок.

Нередки случаи дрейфа станций по дну в районах с сильными течениями и ветрами, что приводит к частым вертикальным и горизонтальным перемещениям измерительных приборов и их возможному выходу из строя. В связи с вышеперечисленными проблемами, закономерно, что в современной практике такие станции чаще всего применяются на относительно небольших глубинах.

Таким образом, использование АБС обладает следующим рядом преимуществ:

- сбор и передача информации в центр обработки в масштабе времени близком к реальному;
- относительно низкая стоимость и простота конструкции;
- относительно высокая автономность (2 года);
- возможность установки широкого спектра измерительных приборов;
- возможность снимать профили гидрофизических параметров.

Однако АБС обладают следующими недостатками:

- относительная сложность установки и демонтажа;
- статичность;
- сильное влияние внешних факторов на работу устройства.

### 1.2.5 Буи-дрифтеры

Дрифтеры — плавающие на поверхности моря устройства, которые предоставляют важные данные о температуре, солености поверхности моря, океанских течениях, высоте волн, атмосферном давлении, а также скорости и направлении приповерхностного ветра, используемые в климатических моделях.

Каждый дрифтер имеет длину менее 15 метров, весит не более 50 килограммов и работают в среднем 18-24 месяца. Он состоит из надводного буя, на котором расположены измерительные приборы, и подводного плавучего тела, которые соединяются при помощи длинного тонкого троса. Соппротивление течению оказывает подводный парус — цилиндр из четырех-семи секций с большим отверстием в центре каждой. Данные отверстия помогают сгладить движение дрифтера по воде, поэтому его скорость и направление лучше соответствуют реальным течениям. Структура дрифтера представлена на рисунке 8.

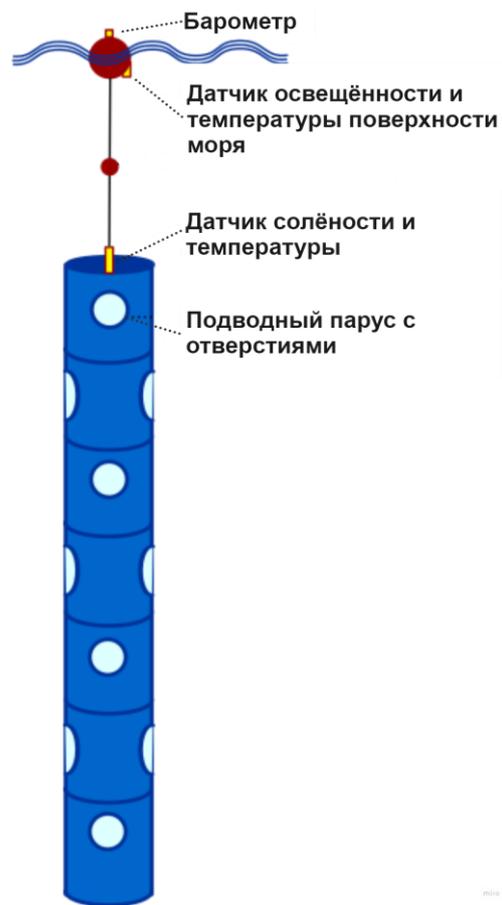


Рисунок 8 — Структура поверхностного дрейфующего буя

Существуют также дрейфующие буи, оборудованные цифровой термопрофилирующей линией с глубиной профилирования до 80 метров (см. рис. 9).

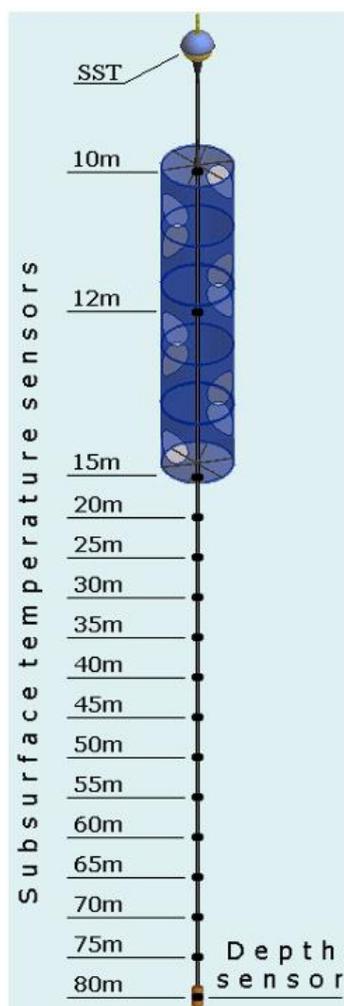


Рисунок 9 — Структура термопрофилирующего дрейфующего буя

Особенность технологии дрейфующих буюв заключается в том, что они предназначены для однократного использования, так как пока они работают, извлекать их из воды не имеет смысла, а поиск устройства, который вышел из строя, практически невозможен из-за его постоянного движения. К тому же стоимость поисковых работ, как правило, намного превышает стоимость изделия. В связи с этим для эффективной работы технологии буюв должны иметь низкую стоимость, но обеспечивать высокую надежность, чтобы оставаться работоспособными на протяжении многих лет при любых погодных условиях. Проблема обеспечения надежности определяет особые требования к разработке корпусно-механических частей, программно-аппаратных средств, к технологии производства, а также к методам испытаний буюв перед запуском.

Плановая численность современной дрейфтерной наблюдательной сети составляет 1250 буюв. Работоспособность всей системы регулируется специальным рабочим органом (DBCP – Комиссия Сотрудничества по Буюм Сбора Данных), созданным Межправительственной Океанографической Комиссией (МОК) и Всемирной Метеорологической Организацией (ВМО)

[1]. Развитие данной технологии осуществляется четырьмя научными центрами: два в США (Скрипский океанографический институт и Национальная Администрация по Океану и Атмосфере – NOAA), Канаде (Агентство по Окружающей Среде) и России (Морской гидрофизический институт). Разработкой и изготовлением буйев занимаются три фирмы в США, одна в Канаде и одна в России (ООО «Марлин-Юг»). Распределение буйев в сети по состоянию на 8 января 2024 г. показано на рис. 10 [17].

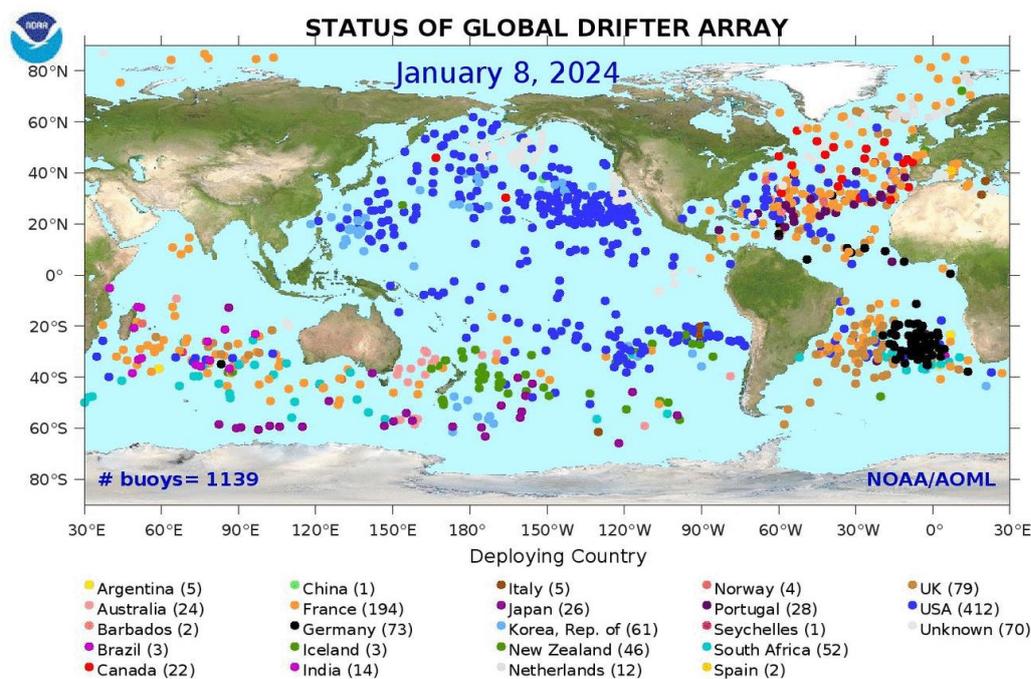


Рисунок 10 — Расположение дрейфующих буйев в глобальной сети по состоянию на 8 января 2024 г.

Таким образом, использование дрейфующих буйев обладает следующим рядом преимуществ:

- сбор и передача информации в центр обработки в масштабе времени близком к реальному;
- относительная простота конструкции;
- относительно низкая стоимость производства и эксплуатации – не требует судна обеспечения, простая транспортировка, легкость развертывания системы;
- возможность масштабирования сети;
- относительно высокая автономность(18-24 месяца);
- возможность снимать профили гидрофизических параметров до 80 метров (термопрофилирующий дрейфующий буй)

- способность покрывать значительные по площадям акватории.

Однако буи-дрифтеры обладают следующими недостатками:

- отсутствие возможности снимать профили гидрофизических параметров (поверхностный дрейфующий буй).

### 1.2.6 Профилирующие буи

Этот тип технических средств мониторинга имеет возможность перемещения по глубине, что позволяет производить вертикальное профилирование водной толщи с измерением контролируемых показателей. К ним могут быть отнесены дрейфующие буи Argo, закоренные стационарные буи.

На сегодняшний день самой развитой автономной системой сбора гидрофизических данных является международная сеть роботизированных дрейфующих профилирующих буюв Argo [1].

Каждый буй Argo запускается с корабля и погружается на определенную глубину за счёт своей массы. Через десять дней балластная система (БС) перекачивает масло из резервуара внутри буя во внешнюю балластную емкость, заставляя буй сначала погружаться на 2 км, а затем аналогичным образом возвращаться на поверхность, измеряя свойства океана по мере его подъема. Данные и положение устройства передаются на спутники, а затем на принимающие станции на берегу. Алгоритм работы буя Argo представлен на рисунке 11.

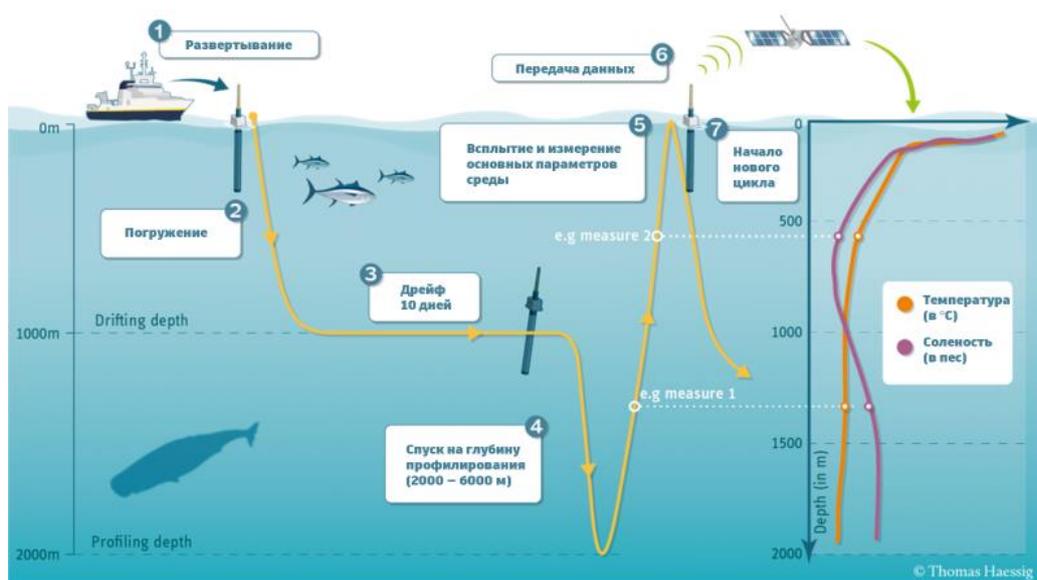


Рисунок 11 — Алгоритм работы буя Argo

На сегодняшний день выделяют 3 типа буев, используемых в сети Argo (см. рис. 12):

- core Argo – буи, измеряющие температуру, соленость и давление на глубине до 2000 м. Самая крупная группировка буев;
- deep Argo – буи, измеряющие температуру, соленость и давление на глубине до 6000 м;
- BGC-Argo – буи для измерения температуры, солености, давления и кислорода, pH, нитратов, хлорофилла, обратного рассеяния, излучения на глубине до 2000 м.

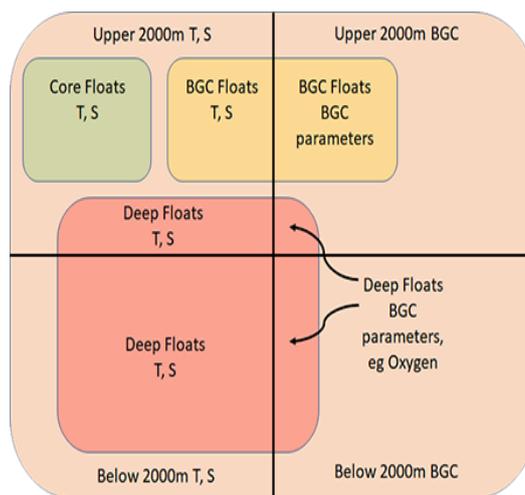


Рисунок 12 — Диапазон применения буев Argo

Рассмотрим состав дрейфующего буя Argo.

Различные модели буев Argo, выпускаемые по всему миру, имеют различия как в аппаратном, так и в программном обеспечении, но в основном работают одинаково.

Все буи Argo оснащены антенной, которая позволяет им связываться со спутниками, чтобы отправлять собранные данные. Большинство буев Argo используют GPS для определения своего местоположения, а для передачи данных – спутники Iridium, использование которых позволяет устройствам тратить меньше времени на передачу большого объема данных на поверхность. Вместо Iridium и GPS некоторые буи используют System Argos (Спутниковая система, которая собирает, обрабатывает и распространяет экологические данные со стационарных и мобильных платформ по всему миру) как для определения местоположения, так и для отправки данных.

В верхней части буя находится датчик солености (электропроводности), температуры, глубины (CTD). Каждый буй Argo управляется контроллером, который содержит программу для запуска буя и обеспечения выполнения им заложенного алгоритма.

БС состоит из внутреннего резервуара, в котором хранится масло, внешней балластной емкости и гидравлического насоса. Накачивание внешней камеры маслом из внутреннего резервуара увеличивает объем буя без изменения массы, тем самым снижая плотность и инициируя всплытие. Откачивание масла из камеры обратно в резервуар увеличивает плотность буя, позволяя ему погрузиться на заданную глубину.

В качестве элементов питания современные буи Argo используют литиевые батареи. Доступная мощность батареи является основным ограничением срока службы буя.

Компоновка буя Argo, стандартная для всех моделей, представлена на рисунке 13.

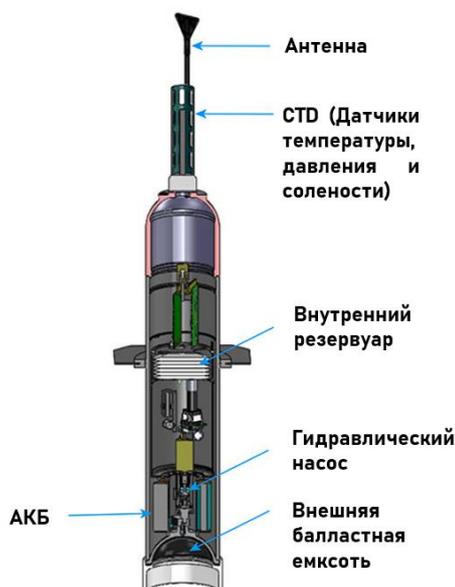


Рисунок 13 — Компоновка буя Argo

По состоянию на 9 января 2024 г., суммарное количество буев, размещенных в Мировом океане составляет 3830 устройства (см. рис. 14).

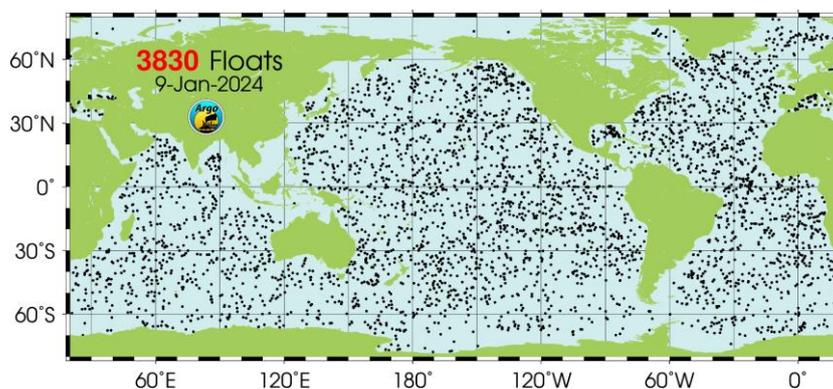


Рисунок 14 — Количество и распределение буев системы Argo по состоянию на 9 января 2024 г.

Таким образом, использование профилирующих буев обладает следующим рядом преимуществ:

- сбор и передача информации в центр обработки в масштабе времени близком к реальному;
- возможность снимать профили гидрофизических параметров (до 6000 метров);
- относительно низкая стоимость производства и эксплуатации – не требует судна обеспечения, простая транспортировка, легкость развертывания системы;
- возможность масштабирования сети;
- относительно высокая автономность (4-5 лет);
- способность покрывать значительные по площадям акватории.

Однако профилирующие буи обладают следующими недостатками:

- необходимость создания сложной системы изменения плавучести.

#### 1.2.5 Современный уровень развития отечественной оперативной океанологии

Россия по праву носит звание морской державы. Ее территорию омывают воды трех океанов: Северного Ледовитого, Атлантического и Тихого. а территории нашей страны находится большое количество окраинных (Баренцево, Карское, Японское) и внутренних (Белое, Балтийское, Черное, Азовское) морей, каждое из которых обладает своими гидрофизическими и гидрологическими особенностями. Всё это говорит о важности развития систем ОО.

В долгосрочной перспективе необходимо разработать прогностические системы для всех окраинных и внутренних морей России, на которых осуществляется хозяйственная деятельность. Кроме того, для ключевых участков побережья страны следует создать специализированные системы наблюдения и прогнозирования, которые позволят контролировать высокочастотную изменчивость прибрежной и шельфовой зон [3].

Рассмотрим современный уровень развития отечественных систем ОО, которые были представлены ранее.

##### а) Донные станции

Однако за последние два года компания АО «МАГЭ» разработала и испытала технологию многоволновой сейсморазведки с донными станциями на мелководье и средне-глубинном шельфе, используя систему донной регистрации «Краб».

До недавнего времени основным поставщиком сейсморазведочного оборудования на рынке (97%) были западные компании, представленные системами автономной донной регистрации производства США, Норвегии и Франции. В связи с этим в течение двух последних лет в компании АО «МАГЭ» была разработана и испытана в производственных условиях технология многоволновой сейсморазведки с донными станциями на мелководье и средне-глубинном шельфе с применением системы донной регистрации «Краб» (см. рис. 15) [18]. На объектах «Газпром нефти» к настоящему моменту уже функционируют около 3000 донных станций.



Рисунок 15 — Донная сейсмическая станция «Краб»

В ОКБ ОТ РАН была разработана цифровая самовсплывающая донная сейсмостанция АДСС-1 (см. рис. 16), предназначенная для исследования строения земной коры и донных осадков с помощью искусственных источников (сейсмическая разведка), а также, для регистрации сигналов от естественных сейсмических явлений на морском дне в диапазоне частот выше 1 Гц.



Рисунок 16 — Цифровая самовсплывающая донная сейсмостанция АДСС-1

В 2022 году прошла первые морские испытания отечественная донная сейсмостанция «Абалон» (см. рис. 17), разработанная концерном «Калашников» с использованием только российских комплектующих. В конце 2023 года станция будет готова к серийному выпуску.

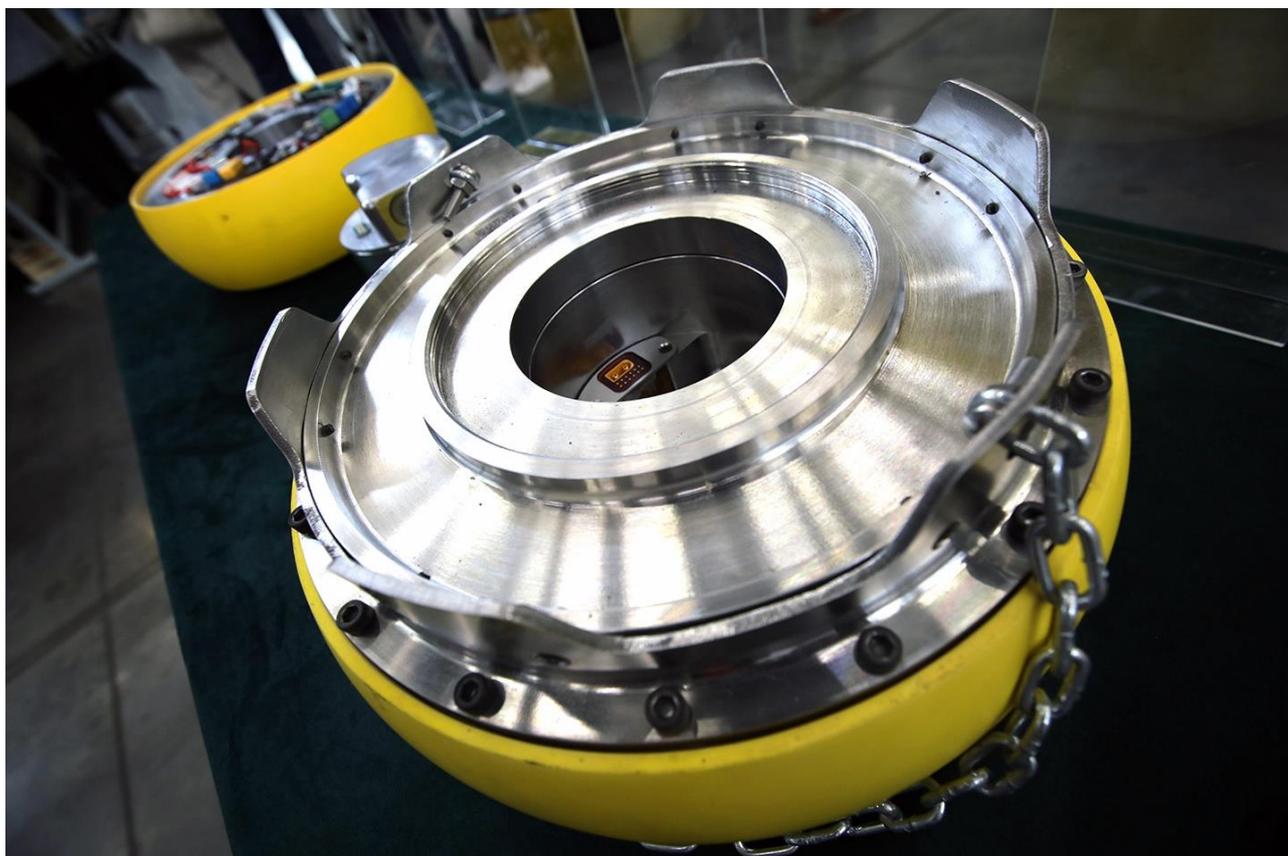


Рисунок 17 — Донная сейсмостанция «Абалон»

б) АНПА

В 2015 г. Самарским государственным техническим университетом был разработан автономный глайдер «Мако-2» (см. рис. 18) для океанографических исследований.

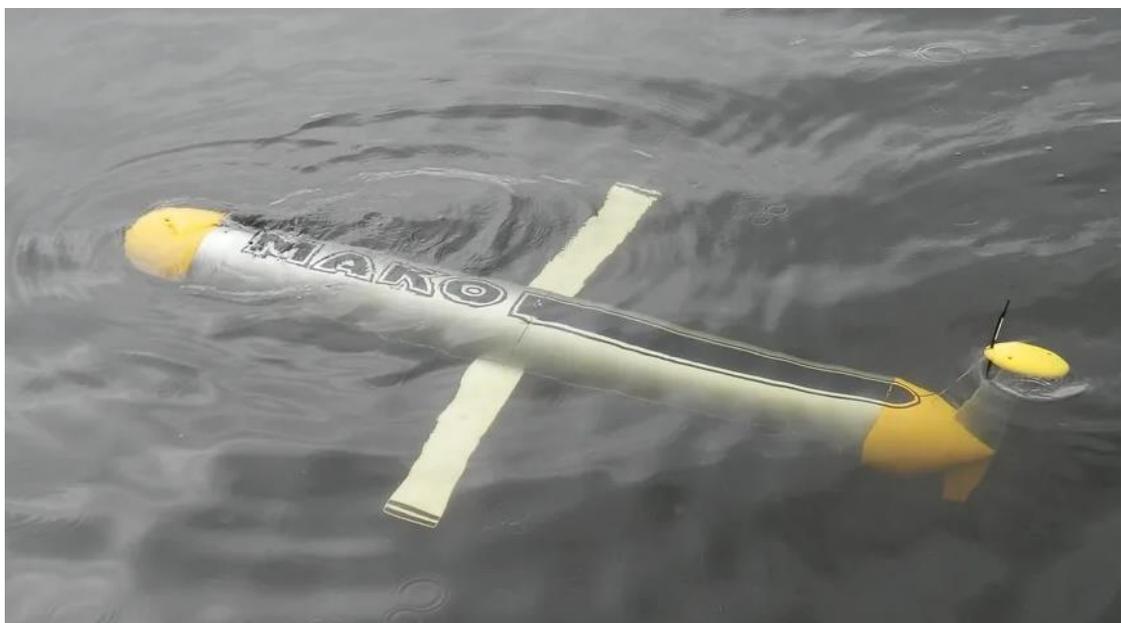


Рисунок 18 — Автономный глайдер «Мако-2»

На данный момент в РФ практически отсутствуют предприятия, занимающиеся комплексной разработкой морской робототехники и, в частности, глайдеров. Так например, в России имеется единственный действующий полнофункциональный образец подводного глайдера, совместно разработанный ФГБОУ ВО СПбГМТУ и АО «НПП ПТ «Океанос» (рис. 19) [19]. Свою работоспособность глайдер подтвердил в ходе многочисленных успешно проведенных испытаний, отработки внутренних систем и опытной эксплуатации.



Рисунок 19 — Образец подводного глайдера ФГБОУ ВО СПбГМТУ и АО «НПП ПТ «Океанос»

с) АБС

АБС являются одной из самых распространенных систем в сфере гидрометеорологических работ.

Так «Северо-Западное управление по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды» осуществляет ежегодную, сезонную установку морского гидрометеорологического буя на о-ве Мощный в Финском заливе (см. рис. 20). Гидрометеорологические данные поступают в Гидрометцентр Санкт-Петербурга. Буй оборудован автоматической системой позиционирования и в случае срыва с якоря начнет передавать свои координаты в центр сбора.



Рисунок 20 — Заякоренный гидрометеорологический буй, установленный в Финском заливе

В ОКБ ОТ РАН была разработана АБС (см. рис. 21), укомплектованная инструментами закрепленными на буйковом канате, якорем, присоединенным посредством гидроакустического размыкателя, поплавковыми сферами, распределенными вдоль буйкового каната с системой обнаружения станции на поверхности.



Рисунок 21 — Платформа станции: приготовление поплавков.

Активное применение АБС нашли в Российском научном центре на архипелаге Шпицберген и Научно-исследовательском стационаре «Ледовая база Мыс Баранова» [20].

С 2012 г. в НК «Роснефть» проводят летние экспедиции в Арктику, когда уровень льда сравнительно небольшой, в ходе которых ученые и инженеры устанавливают автономные буйковые станции. Начальник отдела морских работ Арктического научно-проектного центра Константин Корнишин уверяет, что благодаря полярным экспедициям «более чем на 90% удалось исследовать прочность и плотность льда, особенности гидрологических и метеорологических условий арктических морей», в том числе благодаря установленным 16 притопленным АБС.

#### d) Дрифтеры

Первые комплексные дрейфтерные эксперименты в Черном море проводили с использованием бுவ «ЛОБАН». Цель этих экспериментов состояла в исследовании поля скорости Основного черноморского течения (ОЧТ) в западной части моря [21]. Всего за 10 лет (1987—1997) в Черном море выполнено пять дрейфтерных экспериментов с использованием 14 дрейфующих бுவ типа «ЛОБАН» (см. рис. 22) [22].

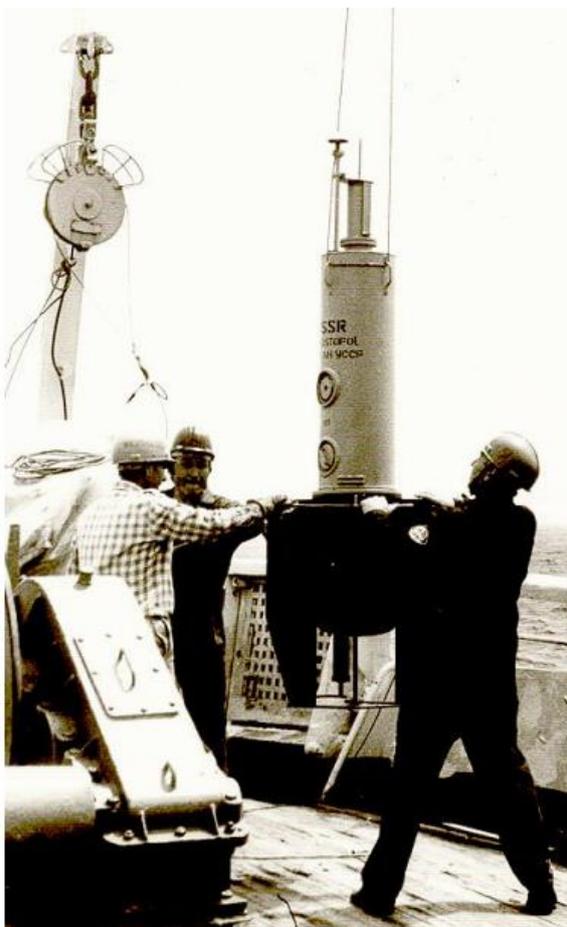


Рисунок 22 — Внешний вид дрефтера ЛОБАН

На данный момент в РФ комплексной разработкой дрейфующих бுவ занимается ООО «Марлин-Юг». За 34 года существования фирма заняла лидирующие в мире позиции в данной области [23]. Была одержана победа в многолетних сопоставительных испытаниях дрефтеров, произведенных различными фирмами, установлен ряд мировых рекордов по продолжительности работы дрейфующих бுவ [24]. На рисунке 23 представлены некоторые модели дрефтеров, выпускаемые компанией.

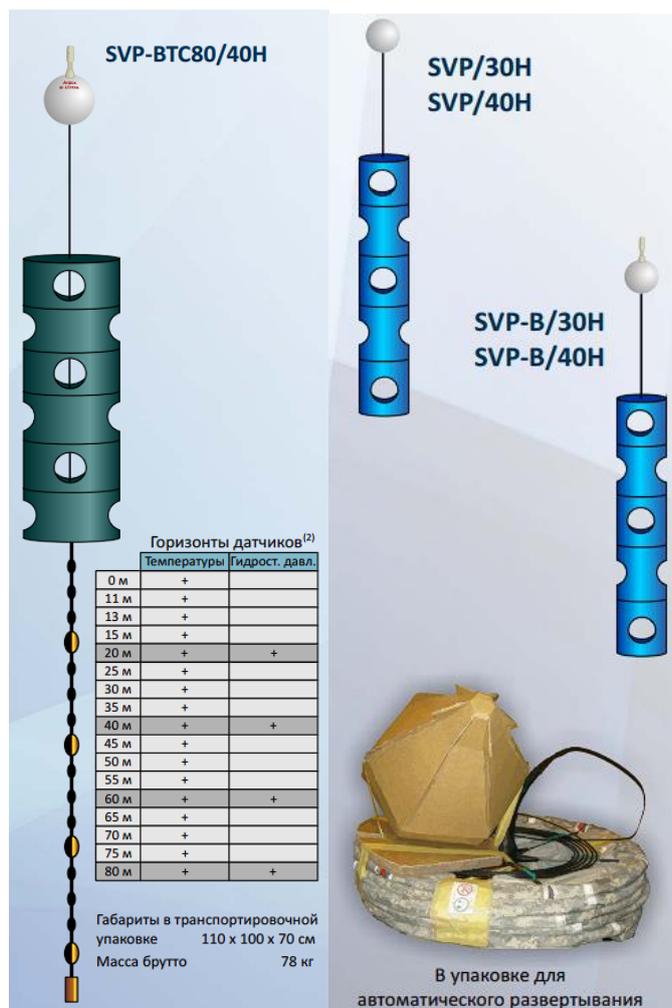


Рисунок 23 — Дрейфующие буи производства ООО «Марлин-Юг»

На основе SVP (Surface Velocity Program) дрейфтеров создано и запущено в производство большое разнообразие типов дрейфующих буйев. Основные научные результаты с использованием дрейфтеров фирмы ООО «Марлин-Юг» были получены при изучении Черного [25,26] и Каспийского морей [27], Южного океана и Арктики, а также при выполнении ряда целевых проектов, например проекта «Штормовой буй».

#### е) Профилирующие буи

В России к подобным устройствам относятся профилограф «Аквазонд» [28] и позиционная автономная гидрофизическая измерительная станция (ПАГИС) [29]. В обоих случаях это стационарные системы, которые перемещаются на тросе с использованием электродвигателя, что существенно сокращает их автономность по сравнению с буйами Argo.

Профилограф «Аквазонд» (см. рис. 24) разработан ИОРАН. Первый прототип имел ADCP (Acoustic Doppler Current Profiler), зонд электропроводности, температуры и давления, датчик концентрации растворенного кислорода, флуориметр и турбидиметр. Профилограф по заданной

программе мог передвигаться по тросу, натянутому вертикально между подповерхностной плавучестью и донным якорем. Дальность передачи данных по радиоканалу до 12 км.

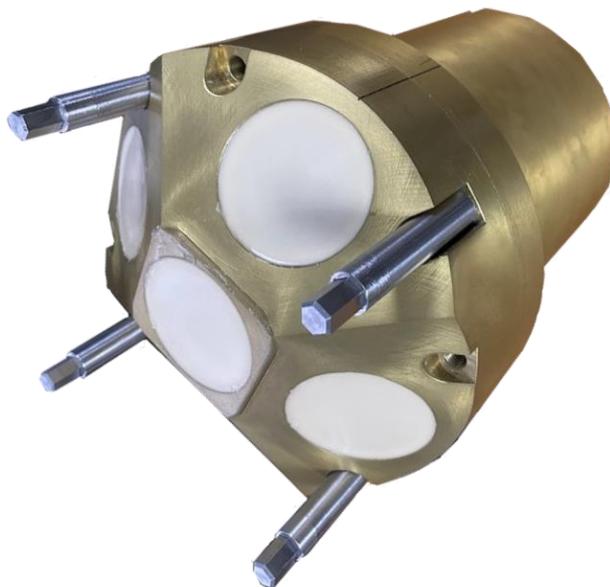


Рисунок 24 — Гидроакустический доплеровский профилограф течений NAECO Aquazond ПТ-600 (ADCP)

ПАГИС (см. рис. 25) предназначена для определения параметров водной среды на глубинах до 200 м и передачи полученных результатов по радио- или гидроакустическому каналу связи [29]. Опционально возможно оснащение датчиками кислорода, радиометрического анализа (гаммаспектрометр), скорости течения, температуры, солёности, волнения, содержания нефтепродуктов. Ресурс батарей ПАГИС позволяет проведение 200 циклов на 200 метров, общее время нахождения в режиме ожидания 240 суток.



Рисунок 25 — Автономная позиционная измерительная станция «ПАГИС»  
циклирующего типа

Рассмотрим участие РФ в международном проекте ARGO. Первые буи-измерители (PALACE производства компании Webb) были представлены российскими учеными в мае 1999 года в совместной российско-японской (JAERI) экспедиции по изучению радиоактивного загрязнения Японского моря [2]. Один из буюв с самого начала остался плавать на поверхности моря и через 6 месяцев был вынесен в Тихий океан. Его дрейф происходил только на поверхности. Вторая пара буюв-измерителей была выставлена в рамках той же программы и имела аналогичную судьбу (один из буюв остался на поверхности и через 6 месяцев прекратил работу). Данные измерений двух буюв (один из них прекратил работу в январе 2002 г.) передавались всем участникам системы «Argo».

С июля 1999 г. Дальневосточным научно-исследовательским гидрометеорологическим институтом (ДВНИГМИ) было использовано около 30 буюв для изучения глубинной циркуляции Японского моря.

В августе 2000 г. четыре, а в августе 2001 г. - семь буюв были размещены в Охотском море. Их траектории, в общем, соответствовали траектория дрейфа поверхностных буюв, размещенных в ДВНИГМИ ранее (1998 г.) С 2002 г. два буюв находились в районе северо-восточнее Курильских островов. Поступающие данные проходили оперативный и задержанный контроль качества в центре «Argo» при ДВНИГМИ.

Таким образом, при анализе отечественных систем ОО было выявлено, что развитие российских средств мониторинга значительно уступает зарубежным. Кроме того, эти и многие другие наработки связаны с использованием импортной техники. Опыт ее эксплуатации способствовал развитию многих направлений исследовательской деятельности, в частности, связанных с калибровкой и использованием различных датчиков, но этого недостаточно.

Данный факт отмечен в «Стратегии развития морской деятельности Российской Федерации до 2030 года» (Распоряжение Правительства РФ № 1930-з от 30 августа 2019 года), где прямо указано на «недостаточное развитие российских океанографических автоматических и автономных средств измерений - дрейфующих буюв различного назначения, притопленных буйковых станций, подводных роботов (глайдеров) и, как следствие, недостаточное развитие исследований океанических процессов как физической основы совершенствования и создания новых методов расчета, диагноза и прогноза состояния океана в широком спектре пространственных и временных масштабов».

До настоящего времени эта проблема на государственном уровне не решена, а предпринятые в последние годы попытки разработки и создания такой системы натолкнулись на трудности научно-технического и методологического характера.

Таким образом, можно сделать вывод, что разработка новейших или модернизация существующих систем ОО позволит преодолеть импортозависимость в этой области, будет способствовать развитию фундаментальной океанологической науки и защите национальных интересов РФ, для изучения обширных морских акваторий которой нужны высокотехнологичные средства мониторинга и сбора данных.

#### 1.2.6 Выводы по разделу

В данном разделе были рассмотрены основные системы ОО, существующие на сегодняшний день. Каждая из них обладает своими достоинствами и недостатками, поэтому были сформулированы основные характеристики систем ОО, на основе которых будет проведен их сравнительный анализ. К ним относятся:

- a) время автономной работы устройства;
- b) оперативность передачи данных;
- c) возможность масштабирования и покрытия больших территорий;
- d) возможность снимать профили параметров.

Рассмотрим подробнее каждую из перечисленных характеристик.

а) Время автономной работы устройства.

На последние десятилетия приходится бурное развитие автономных систем, позволяющих сократить затраты на эксплуатацию и повысить производительность работы. В тоже время автономность устройства играет ключевую роль в разработке систем ОО, особенно если необходимо провести развертывание сети аппаратов на удаленных территориях, где вмешательство человека невозможно.

Самой высокой автономностью обладают профилирующие буи. Продолжительность работы современных моделей ARGO достигает 6 лет, а основным ограничением срока службы устройства является доступный заряд аккумулятора. Еще одной системой с высокой автономностью является АБС (до 2 лет). Срок эксплуатации дрейфующих буев составляет около 450 дней, автономных донных станций — 4-6 месяцев, АНПА — 4-8 месяцев.

б) Оперативность передачи данных.

Оперативная передача данных обеспечивает возможность создания высококачественных прогнозов и своевременного реагирования на гидрометеорологические явления.

Системами с самой оперативной передачей данных (каждые несколько часов) являются донные станции с ретрансляционным бумом, АБС и дрейфующие буи с постоянной связью через спутниковый или радиоканал.

Время между сеансами связи для глайдеров варьируется в зависимости от заданной глубины погружения устройства. Цикл работы профилирующего буя Argo (погружение, всплытие, передача данных) длится 10 дней.

с) Возможность масштабирования и покрытия больших территорий.

Одним из важных факторов при сравнении систем ОО является возможность масштабирования для обеспечения эффективности, гибкости и непрерывности работы системы в условиях постоянно меняющегося состояния океана. Кроме того, покрытие больших территорий позволяет оперативно реагировать на кризисы, обусловленные естественными и техногенными рисками.

Возможность масштабирования была наглядно продемонстрирована сетью профилирующих буев Argo (около 4000 устройств) и сетью дрейфующих буев (около 1000 устройств), покрывающих весь Мировой океан. Этот факт может быть обусловлен относительной простотой конструкции и низкой стоимостью производства и эксплуатации (не

требует судна обеспечения, простая транспортировка). Еще одной системой ОО, показавшей возможность ее масштабирования, является донная станция. Так например, на объектах «Газпром нефти» к настоящему моменту уже функционируют около 3000 донных станций. Однако развертывание сети устройств в удаленных участках Мирового океана затрудняет необходимость транспортировки системы, судна обеспечения и сложность установки и демонтажа.

Глайдеры активно используются в международной практике (более чем 400 устройств), однако они в основном применяются в прибрежных акваториях. Причиной этому может быть относительная низкая автономность устройств (4-8 месяцев) и сложная система автоматического управления. Развертывание сети АБС обладает теми же недостатками, что и донные станции.

d) Возможность снимать профили параметров.

Океан, особенно внутренняя его часть, где краткосрочные колебания температуры от суточной до месячной невелики, является идеальным местом для выявления долгосрочных тенденций потепления в нашей климатической системе, поэтому способность снимать профили гидрофизических параметров — важный фактор при сравнении систем ОО.

Среди представленных устройств такой возможностью обладают глайдеры (максимальная глубина погружения современных моделей составляет 6000 метров), АБС (максимальная глубина работы — 6000 метров, датчики расположены на канате, соединяющем якорь и поверхностный буй) и профилирующие буи (максимальная глубина погружения современных моделей (например DEEP ARGO) составляет 6000 метров).

Дрейфующие буи способны снимать данные только с верхних слоев океана (не более 80 метров), донные станции, которые могут работать на глубине, не превышающей 6000 метров, стационарны, поэтому, наоборот, предоставляют информацию только о состоянии нижних слоев.

Результаты сравнительного анализа систем ОО представлены в таблице 1.

Таблица 1 — Основные характеристики систем ОО

	Время автономно	Возможность масштабирования	Оперативность передачи	Глубина погружения	Возможность снимать
--	-----------------	-----------------------------	------------------------	--------------------	---------------------

	й работы	я	данных	ния	профили параметров
Донные станции с ретрансляционными буем	4-6 месяцев	Средняя	Каждые несколько часов	до 6000 метров	-
Донные станции с подводным кабелем	120 месяцев	Низкая			
АНПА	4-8 месяцев	Средняя	Каждые несколько часов	до 6000 метров	+
АБС	24 месяца	Низкая	Каждые несколько часов	до 6000 метров	+
Буи-дрифтеры	18-24 месяца	Высокая	Каждый час	до 20 метров	-
Профилирующие буи	48-72 месяца	Высокая	Каждые несколько часов	до 6000 метров	+

В результате проведения сравнительного анализа было выявлено, что одной из наиболее перспективных систем ОО является сеть дрейфующих профилирующих зондов. Буи для мониторинга окружающей среды предлагают пользователям множество преимуществ. Они обладают высокой степенью автономности и отличаются простотой эксплуатации, что значительно упрощает процесс развертывания системы. Одним из самых больших достоинств буюв является их универсальность для мониторинга различных компонентов окружающей среды, включая профили гидрофизических параметров и океанические течения.

Таким образом, на основе данных об использовании дрейфующих профилирующих буюв как перспективного средства ОО и необходимости разработки отечественной системы мониторинга было принято решение о создании сети подводных автономных дрейфующих зондов для сбора гидрофизических данных о среде.

## 1.4 Предлагаемое решение

В ходе проекта будет разработан автономный дрейфующий профилирующий зонд для изучения гидрофизических свойств среды. Разрабатываемое устройство будет состоять из следующих сборочных узлов: балластной системы (БС) для изменения глубины погружения, блока питания, блока электроники и внешнего корпуса. Зонд будет оснащен радиомодулем для передачи и приема информации, а также GPS для определения своего местоположения. Одним из основных концептов устройства будет модульность, то есть аппарат имеет возможность менять компоновку в зависимости от требований пользователя. Также будет разработан сайт для предоставления пользователю полной информации об устройстве, визуализации собранных данных и управления зондом. За основу при проектировании буя будет принят профилограф компании MRV SYSTEMS – S2-A (см. рис. 26).



Рисунок 26 — Профилограф S2-A компании MRV SYSTEMS

Устройство будет иметь следующий принцип работы:

1. Устройство спускают на воду и оно отправляет свое местоположение на сервер.

2. Оператор задает целевую глубину погружения устройства, время его дрейфа и запускает цикл.
3. Зонд погружается на заданную глубину. Параллельно идет считывание данных с датчиков с сохранением на SD-карту с некоторой периодичностью.
4. Устройство проводит на глубине заданное количество времени, считывание данных с датчиков продолжается.
5. Зонд всплывает на поверхность, снимая показателя среды, отправляет свое местоположение на сервер. Данные с SD-карты поступают на компьютер оператора для последующей визуализации. Цикл повторяется.

### 1.5 Целевая аудитория

Потребителями разрабатываемого устройства могут стать:

- a) нефте- и газодобывающие компании;
- b) водоохранные организации;
- c) гидрометеорологические службы;
- d) службы по предотвращению чрезвычайных ситуаций;
- e) рекреационная индустрия;
- f) рыболовецкие компании;
- g) коммерческие организации;
- h) научно-исследовательские институты.

Рассмотрим подробнее каждое из перечисленных направлений:

- a) нефте- и газодобывающие компании;

Россия располагает значительными запасами полезных ископаемых на шельфе дальневосточных и арктических морей, который имеет самую большую в мире площадь - свыше 6 млн. км<sup>2</sup>, а размеры исключительной экономической зоны составляют около 8,5 млн. км<sup>2</sup>. Крупнейшими операторами лицензионных участков являются ПАО «Газпром» и ПАО «НК «Роснефть», которые уже эксплуатируют или реализуют крупные проекты по добыче углеводородов на российском шельфе.

Однако разведка, обустройство и эксплуатация морских месторождений, включающая в себя строительство крупных объектов инфраструктуры (добывающих платформ, нефтяных и газовых терминалов, трубопроводов), представляют серьезную опасность для морских экосистем [30]. Значительные объемы нефти попадают в море и в процессе ее транспортировки из районов добычи [31]. По этим причинам согласно лицензионным обязательствам нефте- и газодобывающие компании должны проводить комплекс геологоразведочных работ в задействованных акваториях. Так например, «Роснефть» называет следование требованиям

российского природоохранного законодательства и соблюдение всех норм экологической и промышленной безопасности важнейшими принципами реализации шельфовых проектов [32].

Контроль за текущим состоянием, оценка динамики параметров окружающей среды, оперативное реагирование на чрезвычайные ситуации на объектах инфраструктуры, расположенных на шельфе арктических и дальневосточных морей, как раз и должны осуществляться системами ОО. В частности, решение представленного спектра задач может быть реализовано посредством использования разрабатываемой сети подводных автономных гидрофизических зондов.

б) водоохранные организации;

Широкое применение разрабатываемая сеть зондов может найти при выполнении государственными структурами или коммерческими организациями деятельности, направленной на обеспечение защиты окружающей среды и биосферы, контроля за загрязнениями бассейнов и контроля качества воды. Мониторинг и прогнозирование состояния морской среды являются основой информационного обеспечения, необходимого для безопасного и рационального использования акваторий и эффективного управления морскими ресурсами.

В РФ функции по оказанию государственных услуг и федеральному управлению в сфере водных ресурсов выполняет Федеральное агентство водных ресурсов России — федеральный орган исполнительной власти, находящийся в ведении Министерства природных ресурсов и экологии Российской Федерации. В числе основных функций Агентства — обеспечение мероприятий по рациональному использованию, восстановлению и охране водных объектов.

В соответствии с пунктом 4 постановления Правительства Российской Федерации от 16 июня 2004 года № 282 "Об утверждении положения о Федеральном агентстве водных ресурсов" Федеральное агентство водных ресурсов осуществляет свою деятельность непосредственно или через свои территориальные органы и через подведомственные организации во взаимодействии с другими федеральными органами исполнительной власти, органами исполнительной власти субъектов Российской Федерации, органами местного самоуправления, общественными объединениями и иными организациями.

Таким образом, разрабатываемая система ОО может быть применена при проведении работ по контролю уровня загрязнения акваторий в ходе деятельности перечисленных организаций. Одной из перспективных задач сети зондов может стать разработка отдельных систем отслеживания качества воды всех окраинных и внутренних морей России, в которых сосредоточена хозяйственная деятельность.

с) гидрометеорологические службы;

Сведения, поступающие с систем мониторинга акваторий, используются для оперативной подготовки диагностических и прогностических материалов, необходимых для поддержки

гидрометеорологического обслуживания морской деятельности. Развертывание систем ОО, обеспечивающих передачу данных в режиме, близком к реальному времени, в наиболее важных зонах прибрежных территорий способствует созданию высококачественных систем прогноза бассейнов и позволяет контролировать высокочастотную изменчивость прибрежной и шельфовой зон.

В России ответственность за организацию и деятельность системы наблюдения и контроля за состоянием природной среды несет Федеральная служба России по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды — Госгидромет РФ. Таким образом, использование разрабатываемого устройства как средства ОО может способствовать созданию высококачественных прогнозов.

d) службы по предотвращению чрезвычайных ситуаций;

Прогнозирование состояния морской среды позволяет своевременно реагировать на кризисы, обусловленные естественными и техногенными рисками. В целях предотвращения или минимизации ущерба в мире применяются системы ОО раннего предупреждения (о прибрежных наводнениях, повреждениях, наносимых льдом и штормами, опасных цветениях воды, поступлении загрязняющих веществ и так далее).

Развитие оперативных океанографических систем также направлено на обеспечение оперативной информацией федеральные органы исполнительной власти или иные организации, принимающие решения, с целью снижения рисков для жизни и здоровья людей в результате естественных и техногенных катастроф, сохранения морских экосистем и смягчения последствий изменения климата.

Прогнозы состояния морской среды также важны для обеспечения безопасности при проведении гуманитарных, спасательных и миротворческих операций и операций быстрого развертывания в кризисных зонах. На официальном сайте Национальной технологической инициативы ставится задача “обеспечить национальную безопасность, качество жизни людей, развитие отраслей нового технологического уклада”. Разрабатываемая сеть подводных зондов должна стать одним из инструментов достижения этой цели.

Ответственность за предупреждение и ликвидацию негативного воздействия гидрологических природных явлений в РФ несет Федеральное агентство водных ресурсов России. В непосредственной ликвидации чрезвычайных ситуаций принимают участие такие организации, как МЧС России, «ЭКОСПАС» (АО «Центр аварийно-спасательных и экологических операций» и другие. Также существуют компании, проводящие оценку возможных последствий и рисков природных процессов и техногенных аварий и разрабатывающие комплексные решения для обеспечения безопасности, как например Центр

исследований экстремальных ситуаций. Все вышеперечисленных организации — потенциальные потребители разработанной сети подводных автономных зондов.

е) рекреационная индустрия;

Потребителями разрабатываемого устройства могут выступать представители рекреационной индустрии. Их заинтересованность в морских прогнозах объясняется открывающимися возможностями повысить уровень обслуживания туристов, предоставляя, например, информацию о качестве морской воды на пляжах, прогнозы температуры морской воды в зоне отдыха для его оптимизации, информацию о течениях и волнении для яхтинга, дайвинга и других видов активного отдыха.

ф) рыболовецкие компании;

В рыболовстве широко используются устойчивые связи гидрофизических параметров, мезомасштабных вихрей, струй, фронтов с особенностями концентрации объектов в рыбопромысловые скопления [33, 34]. Таким образом, зная условия обитания и поведение промысловых рыб [35], можно оценить расположение рыбопромысловых районов по собранной информации.

Использование систем ОО обладает большим потенциалом в рыболовстве. Снижение стоимости их производства делает данные более доступными и позволяет получить средства сбора информации о перспективных районах промысла, а также повысить эффективность работы рыбодобывающего флота [36].

Таким образом, системой, предоставляющей данные наблюдений за текущим состоянием поверхности океана и позволяющей оценить районы с комфортными условиями для конкретного рыбопромыслового объекта, может стать разрабатываемая сеть автономных зондов.

г) коммерческие организации;

Использование результатов морских прогнозов, основанных на данных, собранных с разрабатываемого устройства, позволит обеспечить экологическую защищенность и безопасность индустриальных проектов, что способствует повышению престижа компаний, занимающихся их реализацией.

h) научно-исследовательские институты

Получение обширной оперативной информации выводит на новый уровень научные океанологические исследования. Поступающие данные наблюдений за акваториями используются для разработки и верификации климатических моделей, методов и технологий расчета и прогноза основных параметров морской природной среды. Эти сведения помогают ученым лучше понять изменения физического состояния акваторий с течением времени и отслеживать циркуляцию вод Мирового океана. Одним из ценных аспектов данных является их

способность напрямую связывать изменения биогеохимических свойств с их физическими факторами. В результате подобных исследований улучшаются климатические модели.

Эффективность систем ОО в научно-исследовательской сфере подтверждает опыт использования международной сети буев ARGO, благодаря которой, например, было выявлено и объяснено резкое потепление приполярной части Северной Атлантика, а также была исследована связь между биологической продуктивностью и топографией морского дна, в частности при изучении весеннего цветения фитопланктона в Южном океане.

Таким образом, международный опыт наглядно продемонстрировал высокую эффективность систем ОО при проведении научно-исследовательских работ. В связи с этим было выявлено, что согласно данным федеральной службы по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды в России функционируют 17 научно-исследовательских учреждений, которые могут быть заинтересованы в разрабатываемом устройстве, такие как ранее упомянутый ДВНИГМИ, Сибирский региональный научно-исследовательский гидрометеорологический институт и другие [37].

## 1.5 Моделирование параметров изделия

В данном разделе будет рассмотрено моделирование прочностных, гидродинамических параметров разрабатываемого дрейфующего зонда.

Будет произведен численный расчет толщины стенок изделия, а затем произведено моделирование его прочного корпуса на заданной глубине для определения запасов по прочности и устойчивости.

Также будет проведено моделирование гидродинамического коэффициента сопротивления для различных конфигураций устройства и режимов его плавания.

### 1.5.1 Гидродинамический расчет

В данном разделе будет рассмотрен расчет гидродинамических характеристик спроектированного дрейфующего зонда.

Цель расчета: получить гидродинамический коэффициент сопротивления устройства, а также сравнить полученные численные результаты с теоретическими оценками [38,39]. Выбрать наиболее подходящую геометрию обтекателей (сферические, плоские или конусообразные крышки).

Расчет будет производиться в пакете САПР Solidworks в дополнении Flow Simulation (FS).

Начальные данные для расчета приведены в таблице 2.

Таблица 2 - Начальные данные для гидродинамического расчета

Параметр	Значение	Единицы измерения
Число Рейнольдса (Re)	$1,5 \cdot 10^5$	
Характерный размер ( $d_{mid}$ )	90	мм
Характерная длина (L)	670	мм
Характерная площадь ( $\frac{S_{хар}}{2}$ )	0,00318	м <sup>2</sup>
Динамическая вязкость воды при 0 градусов ( $\mu$ )	$1,79 \cdot 10^{-3}$	Па · с
Плотность воды ( $\rho$ )	1025	кг/м <sup>3</sup>

Гидродинамический коэффициент сопротивления зонда может быть вычислен по следующей формуле:

$$C_z = \frac{F_z}{q_\infty \cdot \frac{S_{хар}}{2}} \quad (1)$$

где:

$q_\infty$  – скоростной напор (Па), вычисляемый по формуле:

$$q_{\infty} = \frac{\rho V^2}{2} \quad (2)$$

где:

$V$  – скорость невозмущенного набегающего потока (м/с):

$$V = \frac{Re \cdot \mu}{\rho \cdot d_{mid}} \quad (3)$$

Произведем расчет скорости невозмущенного набегающего потока и скоростного напора, согласно формулам (2) и (3):

$$V = \frac{1,5 \cdot 10^5 \cdot 1,79 \cdot 10^{-3}}{1025 \cdot 0,09} = 2,911 \frac{\text{м}}{\text{с}} \quad (4)$$

$$q_{\infty} = \frac{1025 \cdot 2,911^2}{2} = 4342,9 \text{ Па} \quad (5)$$

Таким образом, для вычисления гидродинамического коэффициента сопротивления, согласно (1) необходимо знать силу  $F_z$ , которая будет вычислена путем моделирования. Значения будут получены для нескольких ситуаций: погружение и всплытие устройства с плоскими, конусообразными и сферическими крышками.

Конфигурации устройств с разной геометрией обтекателей представлена на рисунках 27 — 29.



Рисунок 27 — 3D-модель устройства со сферическими крышками



Рисунок 28 — 3D-модель устройства с плоскими крышками



Рисунок 29 — 3D-модель устройства со конусообразными крышками

Следует учесть, что при вертикальном всплытии сопротивление оказывает верхняя крышка с расположенными на ней средствами связи и датчиками (см. рис. 30). Обоснование подбора электронной компонентной базы будет приведено в следующих разделах.

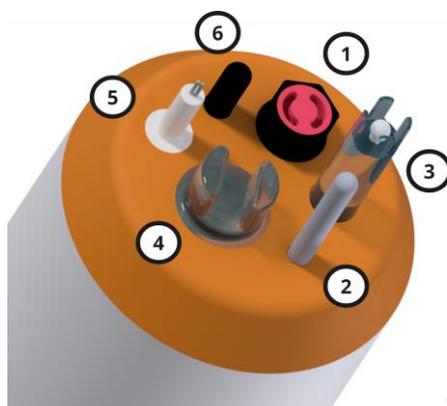


Рисунок 30 — Датчики и средства связи, расположенные в верхней крышке зонда: 1 – датчик давления, 2 – датчик температуры, 3 – датчик кислотности, 4 – датчик мутности, 5 – TDS/ЕС-метр, 6 – антенна для радиосвязи

Результаты моделирования гидродинамических параметров для трех конфигураций представлены на рисунках 31-36. Дополнительно на рисунках 37-39. представлены случаи для всех типов обтекателей, когда течение перпендикулярно оси погружения зонда.

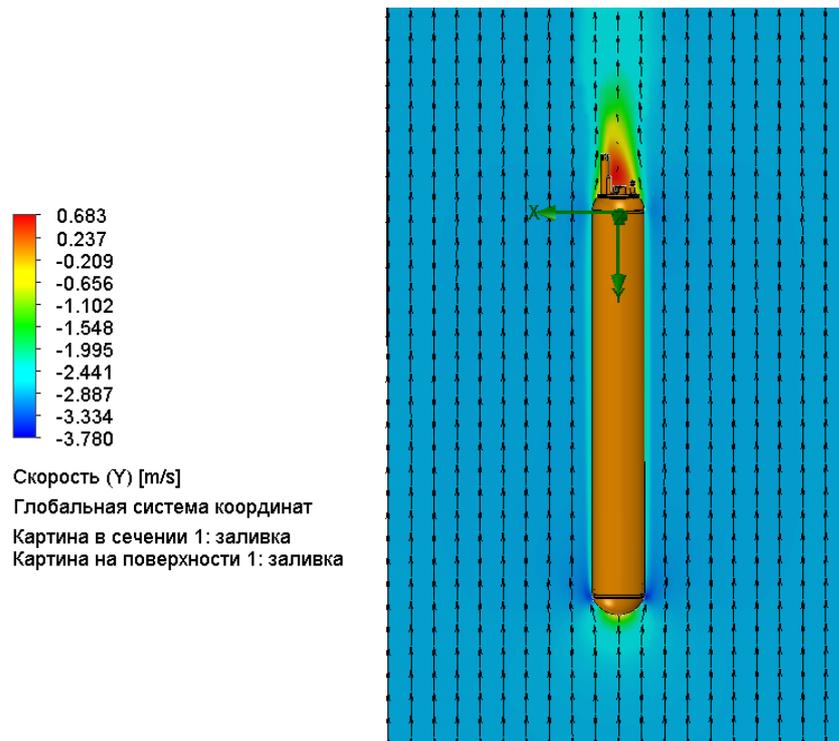


Рисунок 31 — Обтекание тела со сферическим дном при погружении

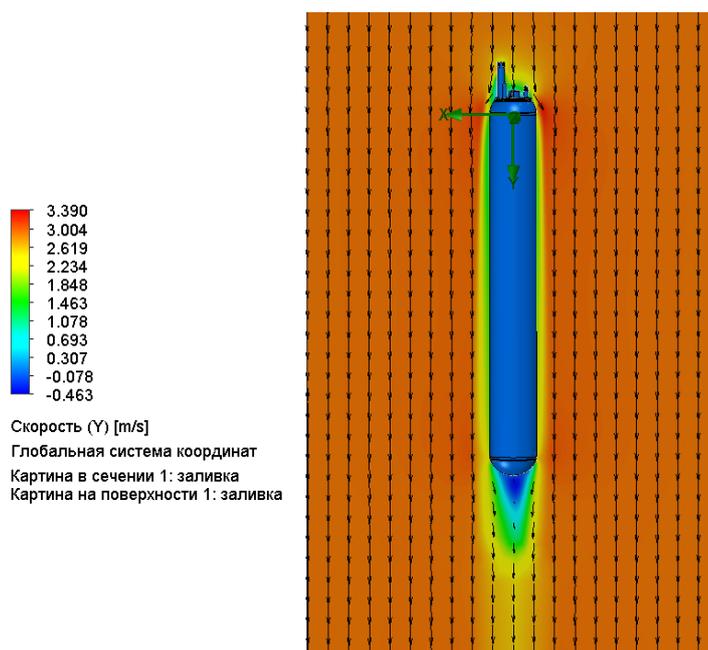


Рисунок 32 — Обтекание тела со сферическим дном при всплытии

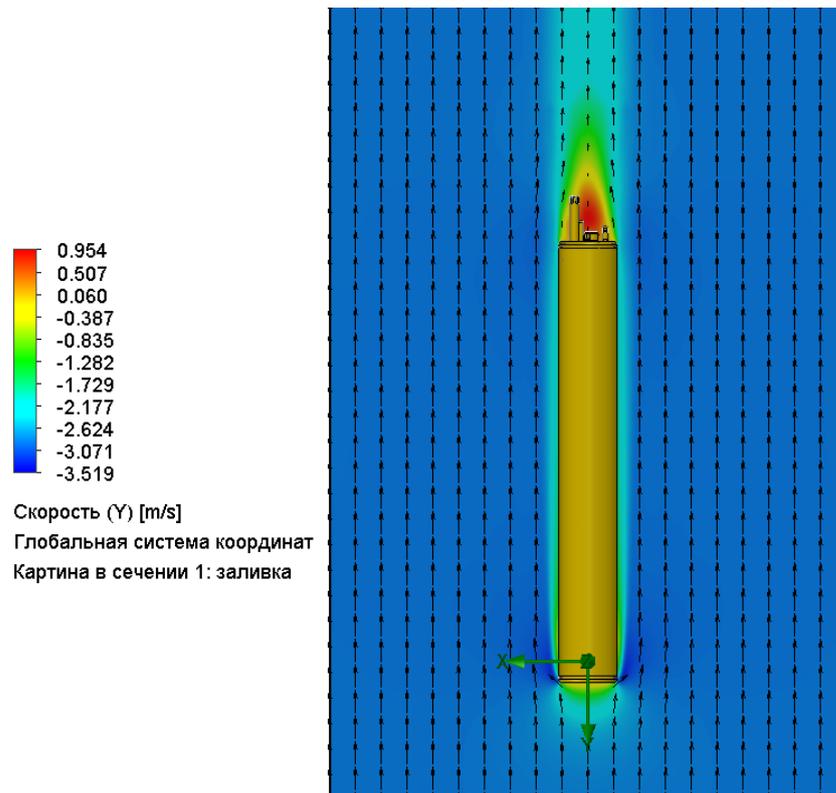


Рисунок 33 — Обтекание тела с плоским дном при погружении

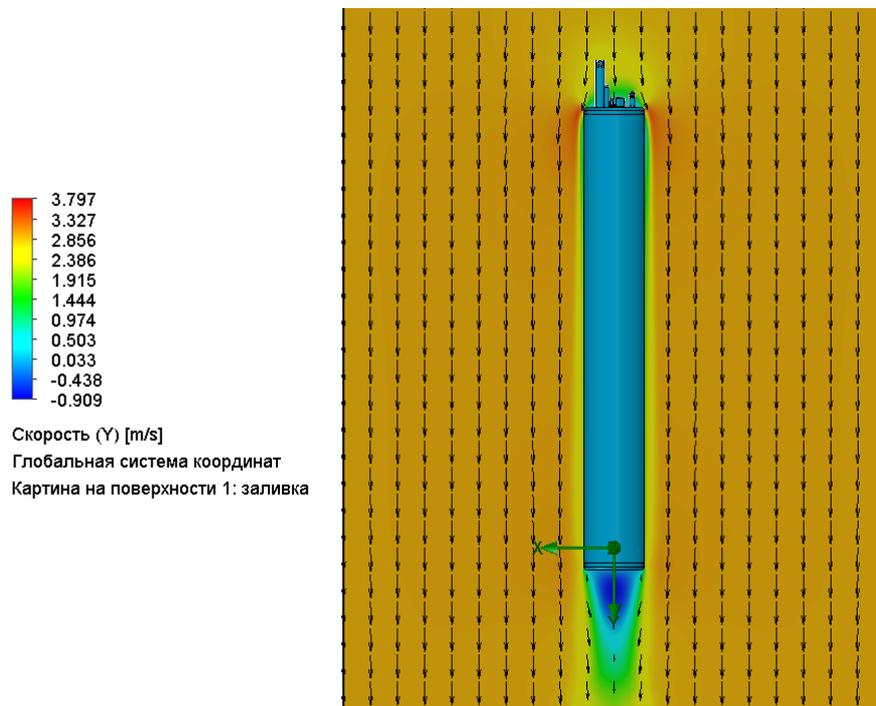


Рисунок 34 — Обтекание тела с плоским дном при всплытии

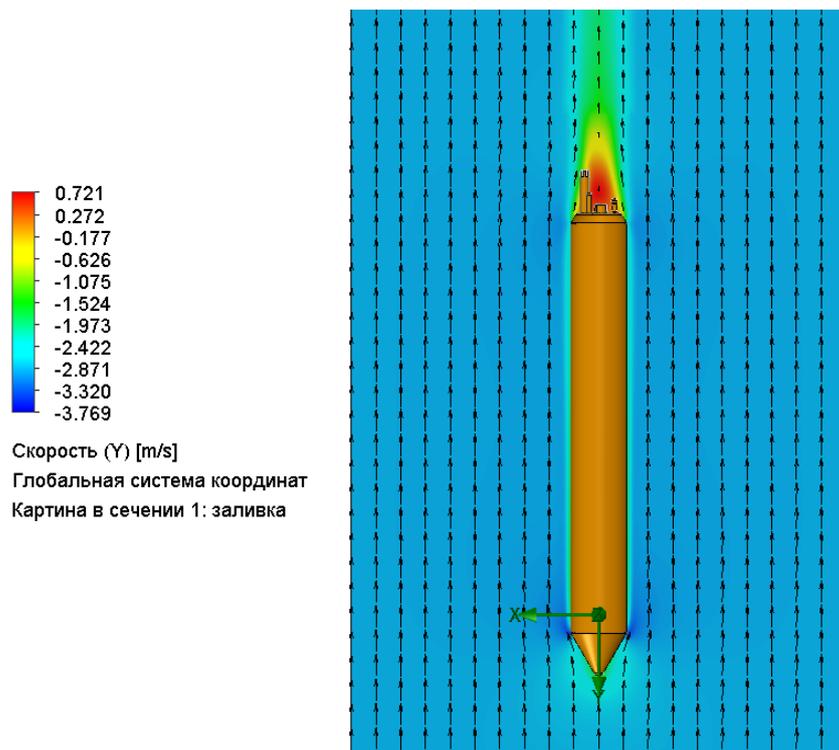


Рисунок 35 — Обтекание тела с конусообразным дном при погружении

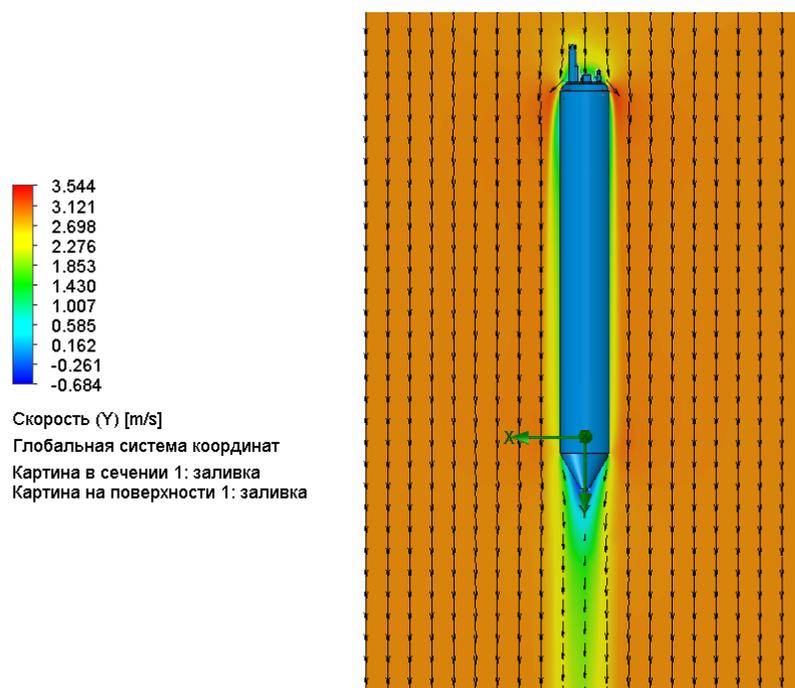


Рисунок 36 — Обтекание тела с конусообразным дном при всплытии

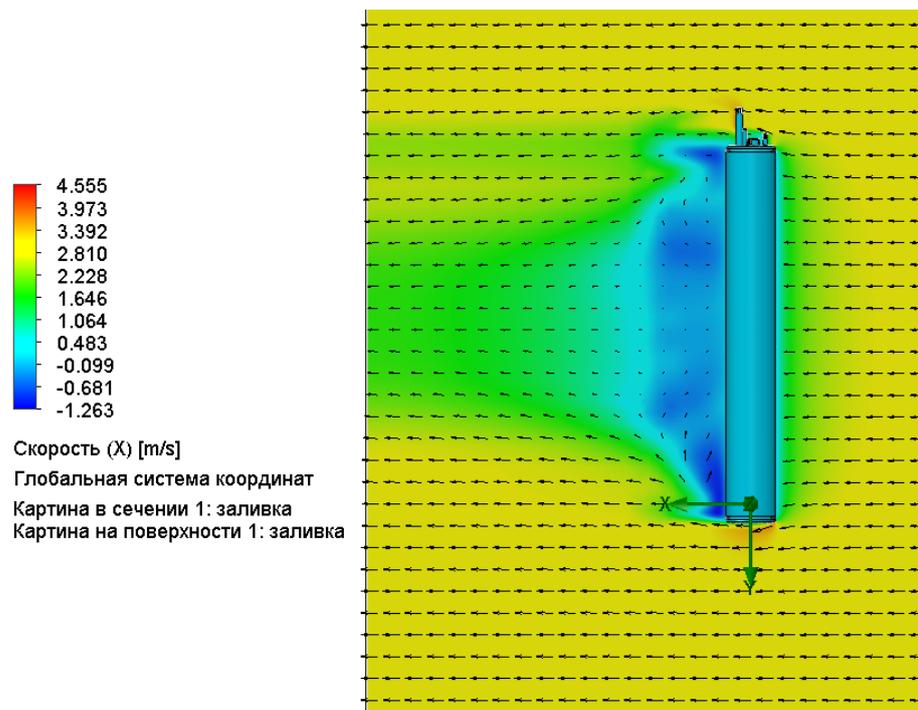


Рисунок 37 — Обтекание тела с плоским дном (течение перпендикулярно оси погружения зонда)

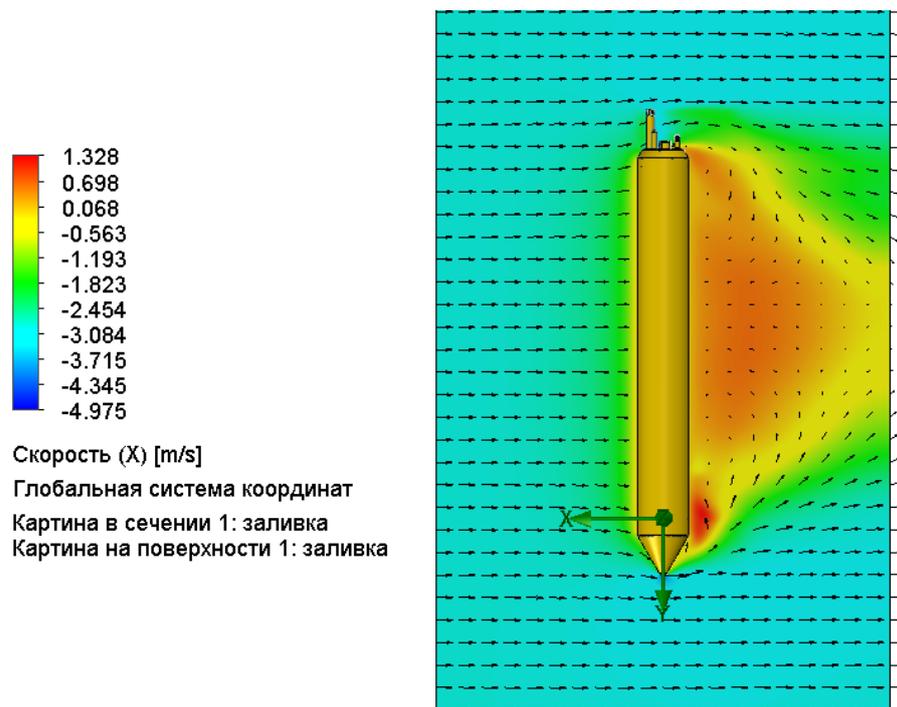


Рисунок 38 — Обтекание тела с конусообразным дном (течение перпендикулярно оси погружения зонда)

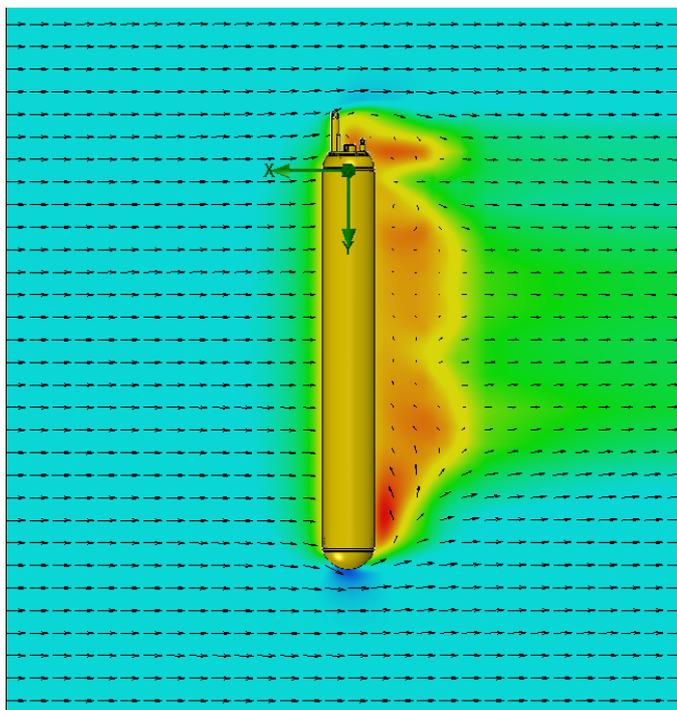


Рисунок 39 — Обтекание тела со сферическим дном (течение перпендикулярно оси погружения зонда)

В результате моделирования были получены значения силы  $F_z$ , представленные в таблице 3.

Таблица 3 - Результаты моделирование гидродинамических параметров

Исследование	Значение , Н
Погружение со сферическим дном ( $F_z^{Cп}$ )	3,738
Всплытие со сферическим дном ( $F_z^{CB}$ )	2,757
Погружение с плоским дном ( $F_z^{Пп}$ )	6,496
Всплытие с плоским дном ( $F_z^{Пп}$ )	3,686
Погружение с конусообразным дном ( $F_z^{Пп}$ )	3,836

Всплытие с конусообразным дном ( $F_z^{\text{Пп}}$ )	2,555
--	-------

Вычислим гидродинамические коэффициенты сопротивления с учетом полученных значений  $F_z$ :

$$C_z^{\text{Сп}} = \frac{F_z^{\text{Сп}}}{q_\infty \cdot \frac{S_{\text{хар}}}{2}} = \frac{3,738}{4342,9 \cdot 0,00318} = 0,27 \frac{\text{Н}}{\text{м}^2 \cdot \text{Па}} \quad (6)$$

$$C_z^{\text{СВ}} = \frac{F_z^{\text{СВ}}}{q_\infty \cdot \frac{S_{\text{хар}}}{2}} = \frac{2,757}{4342,9 \cdot 0,00318} = 0,20 \frac{\text{Н}}{\text{м}^2 \cdot \text{Па}} \quad (7)$$

$$C_z^{\text{Пп}} = \frac{F_z^{\text{Пп}}}{q_\infty \cdot \frac{S_{\text{хар}}}{2}} = \frac{6,496}{4342,9 \cdot 0,00318} = 0,47 \frac{\text{Н}}{\text{м}^2 \cdot \text{Па}} \quad (8)$$

$$C_z^{\text{ПВ}} = \frac{F_z^{\text{ПВ}}}{q_\infty \cdot \frac{S_{\text{хар}}}{2}} = \frac{3,686}{4342,9 \cdot 0,00318} = 0,27 \frac{\text{Н}}{\text{м}^2 \cdot \text{Па}} \quad (9)$$

$$C_z^{\text{Кп}} = \frac{F_z^{\text{Кп}}}{q_\infty \cdot \frac{S_{\text{хар}}}{2}} = \frac{3,836}{4342,9 \cdot 0,00318} = 0,28 \frac{\text{Н}}{\text{м}^2 \cdot \text{Па}} \quad (10)$$

$$C_z^{\text{КВ}} = \frac{F_z^{\text{КВ}}}{q_\infty \cdot \frac{S_{\text{хар}}}{2}} = \frac{2,555}{4342,9 \cdot 0,00318} = 0,19 \frac{\text{Н}}{\text{м}^2 \cdot \text{Па}} \quad (11)$$

Выводы по главе: Значение гидродинамического коэффициента  $C_z^{\text{Сп}}$  с точностью до сотых совпадает с табличным значением для упрощенного тела цилиндрической формы со скругленными концами. Значения коэффициента  $C_z^{\text{СВ}}$  отличаются от табличного на 29%. Значения коэффициента  $C_z^{\text{ПВ}}$  и  $C_z^{\text{Пп}}$  отличаются от табличного (для упрощенного тела цилиндрической

формы с плоскими гранями [38]) в среднем на 58%. Значения коэффициента  $C_z^{КВ}$  и  $C_z^{КП}$  отличаются от табличного (для упрощенного тела цилиндрической формы с конусообразными концами) в среднем на 67%. Расхождение теоретических значений и значений, полученных при моделировании, обусловлено сложной геометрией верхней крышки зонда, которая отличается от примитивных форм, рассматриваемых в сборнике. Средние значения коэффициентов для тела с сферическими и конусообразными концами равны, а среднее значение гидродинамического коэффициента для тела с плоскими гранями превышает значение для тела со скругленными (или конусообразными) концами на 36%. Значение коэффициента  $C_z^{КП}$  превышает  $C_z^{СП}$ , значение коэффициента  $C_z^{СВ}$  превышает  $C_z^{КВ}$  поэтому для моделирования корпуса устройства было принято решение выбрать сферическую нижнюю крышку (при вертикальном погружении сопротивление оказывает нижняя крышка) и конусообразную верхнюю (при вертикальном всплытии сопротивление оказывает верхняя крышка).

### 1.5.2 Прочностной расчет

Цель расчета: вычислить толщину обтекателей разрабатываемого зонда, вычислить предельную глубину работы устройства, провести моделирование полученных результатов для определения запасов по прочности и устойчивости.

Расчет будет проводиться на основе 3D-модели устройства, представленной на рисунке 40. Геометрия обтекателей обтекателей была определена в предыдущем разделе (сферическая нижняя крышка и конусообразная верхняя крышка).



Рисунок 40 — 3D-модель устройства, используемая при проведении прочностного расчета

Начальные данные для прочностного расчета приведены в таблице 4.

Таблица 4 - Начальные данные для гидродинамического расчета

Параметр	Значение	Единицы измерения
Коэффициент Пуассона (оргстекло)	0,15	
Модуль нормальной упругости (оргстекло)	3	ГПа
Предел текучести (оргстекло)	110	МПа
Коэффициент Пуассона (PLA-пластик)	0,4	
Модуль нормальной упругости (PLA-пластик)	3	ГПа
Предел текучести (PLA-пластик)	50	МПа
Наружный радиус оболочки	45	мм
Толщина цилиндрической оболочки	3	мм

Устройство заполнено воздухом с нормальным атмосферным давлением. Избыточное давление на предельной глубине:

$$p = \rho gh \quad (12)$$

Максимальное (критическое) давление, допустимое для неподкрепленной цилиндрической оболочки из условий устойчивости, может быть определено по формуле [40]:

$$p_{кр} = \frac{t_1^3 E_1 \eta_1 \eta_2}{4R^3 (1 - \mu_1^2)} \quad (13)$$

Из формул (1) и (2) получаем, что предельная глубина работы зонда:

$$h = \frac{t_1^3 E_1 \eta_1 \eta_2}{4R^3(1 - \mu_1^2)\rho g} \quad (14)$$

где:

$\mu_1$  – коэффициент Пуассона (оргстекло),

$E_1$  – модуль нормальной упругости (оргстекло),

$\eta_1 = 1,0$  – поправочный коэффициент, учитывающий отклонение от геометрической формы и влияние технологии изготовления оболочки при больших глубинах и толщинах,

$\eta_2$  – поправочный коэффициент, учитывающий влияние напряжений на устойчивость оболочки (для предварительных расчетов принять равным 0,7),

$R$  – наружный радиус оболочки.

Тогда максимальная глубина погружения:

$$h = \frac{3^3 \cdot 3 \cdot 10^9 \cdot 1 \cdot 0,7}{4 \cdot 45^3 (1 - 0,15^2) \cdot 1025 \cdot 9,81} = 17 \text{ м} \quad (15)$$

Определим толщину неподкрепленной сферической оболочки из условий устойчивости. Допустимое критическое давление для неподкрепленной цилиндрической оболочки может быть определено по формуле:

$$p_{кр} = \frac{t_2^2 E_2 k_{сф}}{R^2 (1 - \mu_2^2)} \quad (16)$$

где:

$k_{сф}$  - поправочный коэффициент, учитывающий правильность формы и технологию изготовления (для предварительных расчетов принять равным 0,5).

Тогда толщина сферической оболочки будет вычисляться по формуле:

$$t_2 = R \sqrt[3]{\frac{\rho g h (1 - \mu_2^2)}{E_2 k_{сф}}} \quad (17)$$

$$t_2 = 45 \sqrt[3]{\frac{1025 \cdot 9,81 \cdot 17 \cdot (1 - 0,4^2)}{3 \cdot 10^9 \cdot 0,5}} = 2,1 \text{ мм} \quad (18)$$

Таким образом, расчетные значения предельной глубины работы устройства и толщины сферической части устройства:

- $h = 39,7$  мм при  $t_1 = 3$  мм (толщина цилиндрической части зонда)
- $t_2 = 2,1$  мм – толщина сферической части зонда

Для проверки вычисленных параметров прочного корпуса необходимо провести численное моделирование всестороннего обжатия его внешним давлением, а также провести расчет на потерю устойчивости.

Результатом выполнения анализа является получение смещений или деформаций детали под действием внешних нагрузок, на основе которых можно прогнозировать возникновение изломов или критических деформаций.

Расчет будет проводиться в пакете САПР Solidworks.

Проведем расчет на статическую прочность корпуса. Давление разрушения обечайки (цилиндрической части прочного корпуса) принимаем равным приложенному к корпусу давлению, при котором внутреннее напряжение в модели (эквивалентное напряжение по Мизесу) достигает величины предела текучести материала: 110 МПа или контактное давление в модели достигает 1,5 предела текучести материала:  $110 \cdot 1,5 = 165$  МПа (для оргстекла). Аналогично для материала крышки имеем: предел текучести 50 МПа или контактное давление 75 МПа.

Примем следующие допущения и корректировки для обеспечения соответствия модели поставленной задаче, а также для оптимизации параметра времени расчета:

- внешние приборы и устройства (антенны, датчики и пр.) в расчете не участвуют;

- расчетной принимается 1/4 часть сборки прочного корпуса вдоль оси вращения в силу его симметрии.

Результаты анализа напряжений представлены на рисунке 41.

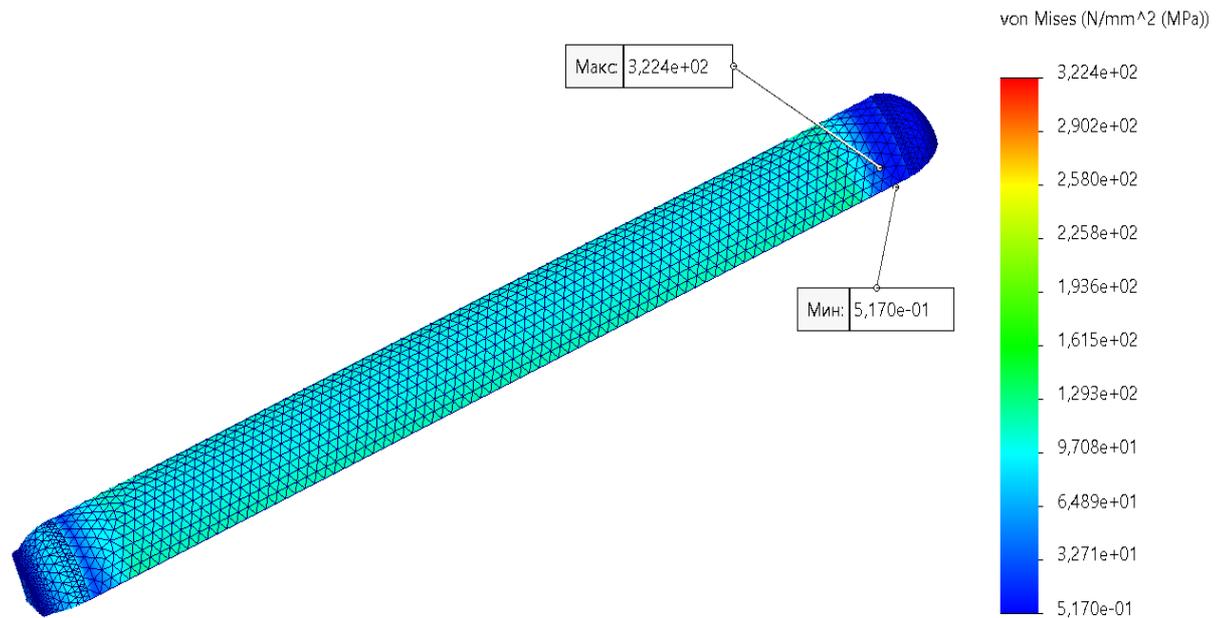


Рисунок 41 — Результаты анализа на прочность

Следует отметить, что расчет производится в линейной постановке. Таким образом, давление разрушение модели возможно найти по максимальным внутренним напряжениям.

На рисунках 42-44 представлены наиболее нагруженные участки обечайки и крышек по результатам моделирования.

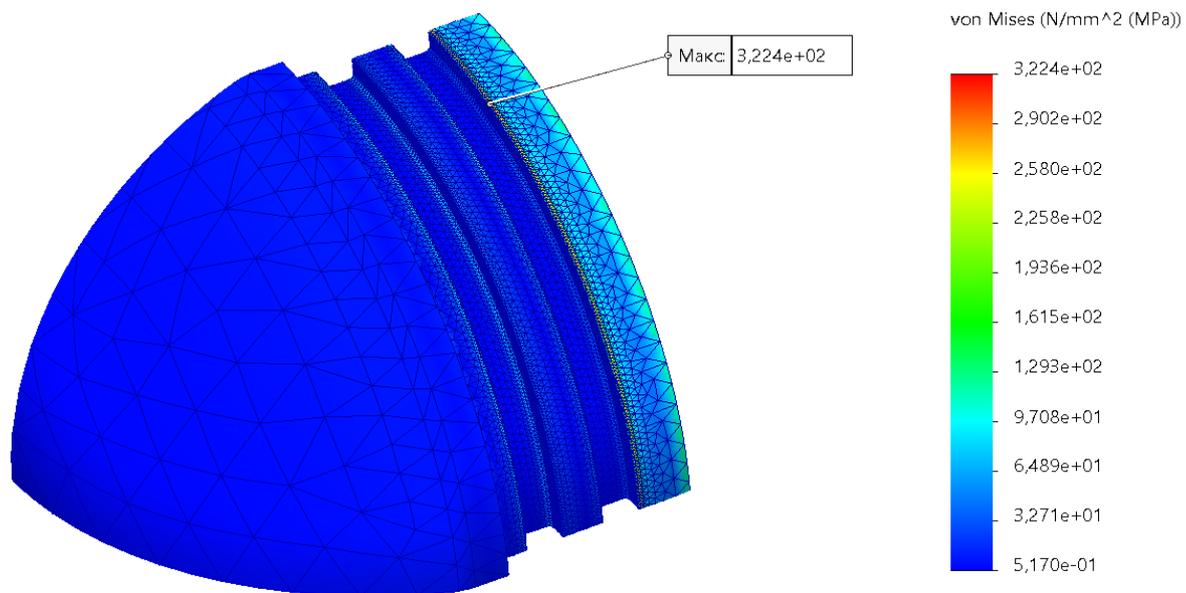


Рисунок 42 — Наиболее нагруженные участки задней крышки

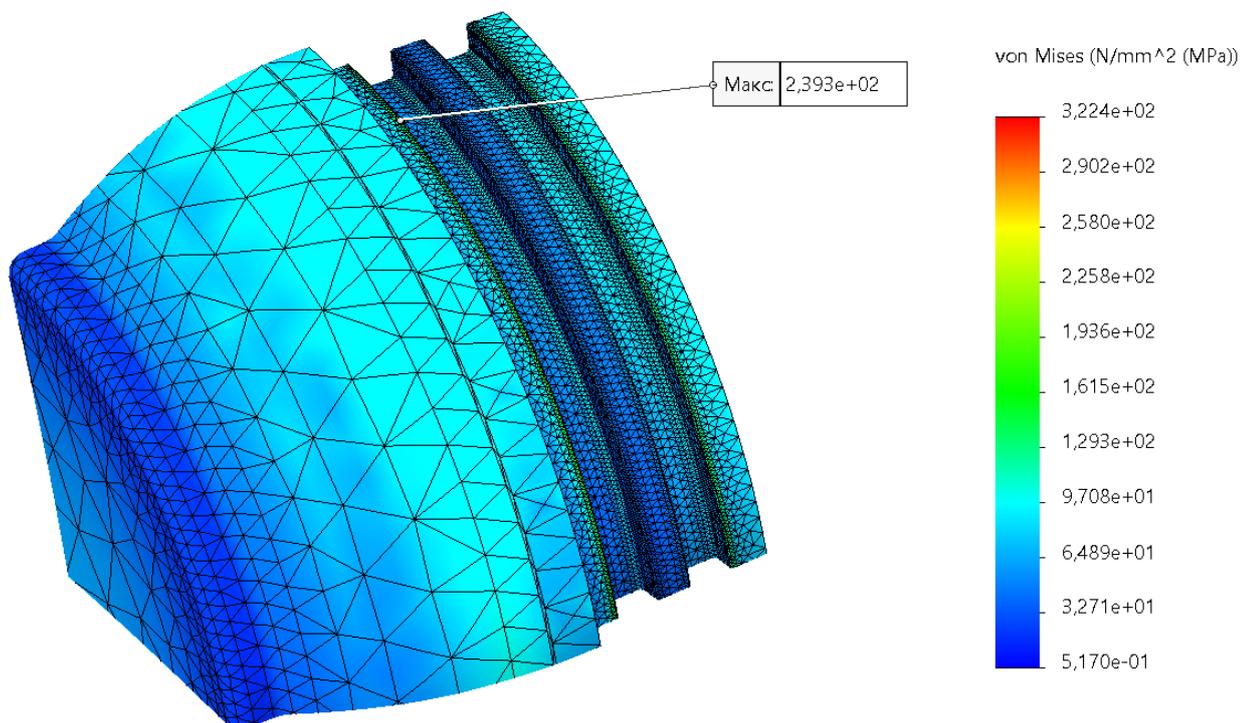


Рисунок 43 — Наиболее нагруженные участки передней крышки

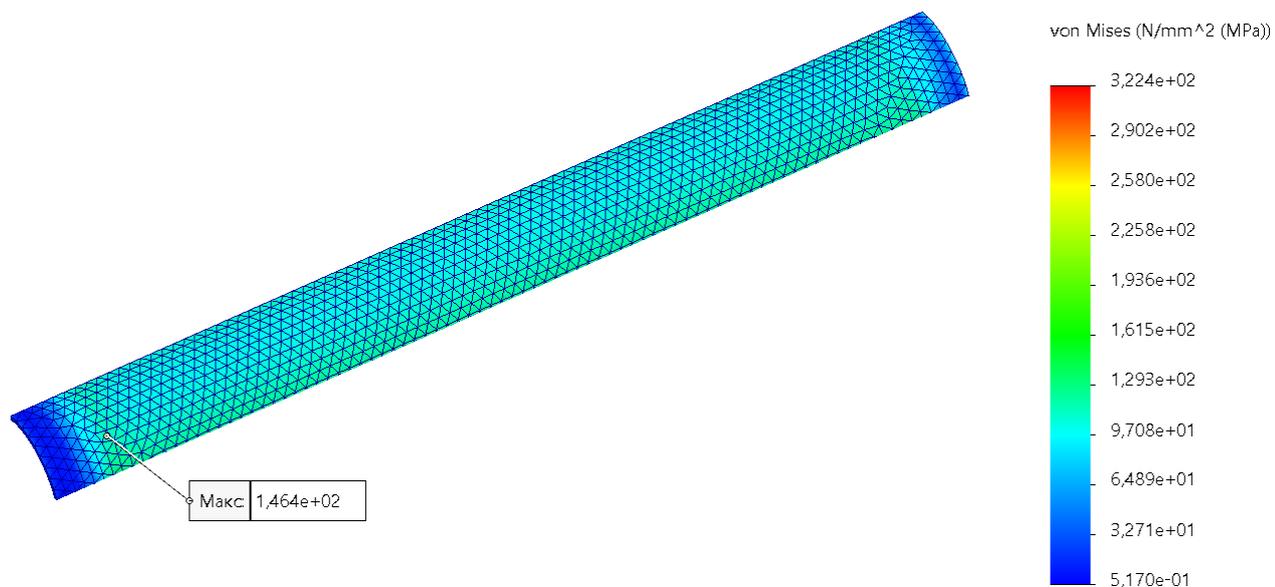


Рисунок 44 — Наиболее нагруженные участки обечайки

Как видно из рисунков 19-21, максимальные напряжения в обечайке и крышке составляют:

$$p_{обечайки}^{10\text{МПа}} = 146 \text{ МПа} \quad (19)$$

$$p_{крышки}^{10\text{МПа}} = 239 \text{ МПа} \quad (20)$$

Как говорилось, ранее, давление разрушения модели по внутренним напряжениям можно найти из пропорции:

$$p_{обечайки}^{Max} = \frac{110\text{МПа} \cdot 10\text{МПа}}{146\text{МПа}} = 7,5 \text{ МПа} \quad (21)$$

$$p_{крышки}^{Max} = \frac{50\text{МПа} \cdot 10\text{МПа}}{239\text{МПа}} = 2,1 \text{ МПа} \quad (22)$$

Максимальные контактные давления в модели составляют:

$$p_{обечайки}^{10\text{МПа}} = 34 \text{ МПа} \quad (23)$$

$$p_{крышки}^{10\text{МПа}} = 62 \text{ МПа} \quad (24)$$

Расчет производится в линейной постановке. Контактное давление в обечайке достигает 1,5 предела текучести материала:  $110 \cdot 1,5 = 165$  МПа, в крышке — 75 МПа. Тогда давление разрушения модели по контактному давлению можно найти из пропорции:

$$p_{обечайки}^{\text{контактMax}} = \frac{165\text{МПа} \cdot 10\text{МПа}}{34\text{МПа}} = 48,5 \text{ МПа} \quad (25)$$

$$p_{крышки}^{\text{контактMax}} = \frac{75\text{МПа} \cdot 10\text{МПа}}{62\text{МПа}} = 12,1 \text{ МПа} \quad (26)$$

Расчет на потерю устойчивости обечайки производим в SolidWorks при помощи линейного анализа потери устойчивости.

Исследование будет производиться для цилиндрического прочного корпуса с закреплениями без разрезов по осям симметрии.

Создаем сетку для расчетов с учетом размеров элементов и приемлемого времени расчета (см. рис. 45).

Имя модели: Прочностной расчет  
 Название исследования: Потеря устойчивости 1(-По умолчанию-)  
 Тип эпюры: Потеря устойчивости Амплитуда2  
 Форма колебаний: 1 Коэффициент нагрузки = 0,038549  
 Шкала деформации: 474,471

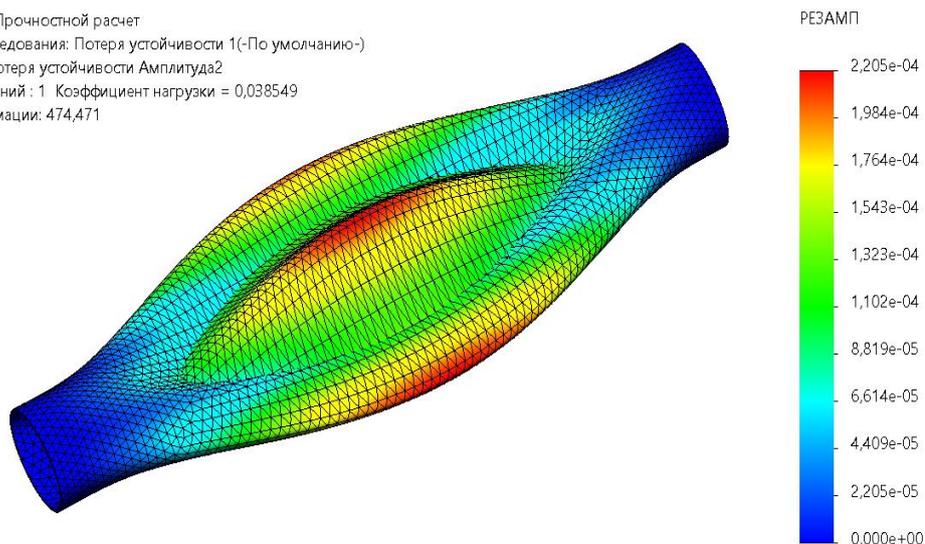


Рисунок 45 — Результат моделирования прочного корпуса на устойчивость

Согласно проведенному исследованию, значение коэффициента нагрузки составляет 0,0385. Коэффициент нагрузки показывает, во сколько раз можно увеличить приложенное к корпусу давление прежде, чем он потеряет устойчивость. Тогда критическое давление потери устойчивости корпуса составляет:

$$p_{\text{корпуса}}^{\text{устойчMax}} = 10 \text{ МПа} \cdot 0,0385 = 385 \text{ кПа} \quad (27)$$

В предыдущих пунктах были получены критические давления в обечайке, представленные в таблице 5.

Таблица 5 — Критические давления в обечайке

Параметр	Значение	Ед. Изм.
По эквивалентным напряжениям ( $p_{\text{обечайки}}^{\text{Max}}$ )	7,5	МПа
По контактному давлению ( $p_{\text{обечайки}}^{\text{контактMax}}$ )	48,5	МПа

По устойчивости ( $p_{\text{корпуса}}^{\text{устойчMax}}$ )	385	кПа
---	-----	-----

Расчет рабочего давления производится по меньшему из них ( $p_{\text{корпуса}}^{\text{устойчMax}}$ ). Испытательное давление превышает рабочее на 25%, и при испытании запас прочности (устойчивости) должен быть не менее 25%. Тогда рабочее давление равняется:

$$p_{\text{обечайки}}^{\text{рабочее}} = \frac{p_{\text{корпуса}}^{\text{устойчMax}}}{1,25 \cdot 1,25} = \frac{385 \text{ кПа}}{1,25 \cdot 1,25} = 246 \text{ кПа} \quad (28)$$

Давление на глубине 17 метров согласно формуле (12) составляет:

$$p = 1025 \cdot 10 \cdot 17 = 174,25 \text{ кПа} \quad (29)$$

$p_{\text{обечайки}}^{\text{рабочее}}$  превышает вычисленное значение, таким образом устройство выдержит пребывание на глубине 17 метров.

Выводы по разделу: в результате прочностного расчета были определены предельная глубина работы устройства и толщина сферической части корпуса, такие как:

- При толщине цилиндрической части корпуса  $t_1=3$  мм предельная глубина работы зонда  $h = 17$  м;
- толщина сферической части корпуса  $t_2 = 2,1$  мм.

Было проведено моделирование на прочность и устойчивость корпуса, по результатам которых было подтверждено, что конструкция выдержит пребывание на глубине 17 метров.

## 2. КОНСТРУКТОРСКАЯ ЧАСТЬ

### 2.1 Определение общего вида и компоновки изделия

#### 2.1.1 Эскизный проект

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

- глубина погружения до 17 метров;
- возможность перемещения по глубине;
- возможность осуществления отслеживания параметров внешней среды;
- возможность реализации распределенной сети устройств.

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

- обеспечить герметичность устройства;
- разработать компоновку системы изменения плавучести (СИП), обеспечивающего перемещение аппарата по глубине;
- определение состава полезной нагрузки изделия (датчиковое оснащение, исполнительные устройства и пр.).

Разрабатываемый зонд конструктивно состоит из следующих сборочных узлов:

- СИП;
- аккумуляторная кислотная батарея (АКБ);
- блок электроники;
- внешний корпус.

3D-модель устройства представлена на рисунках 46-47.

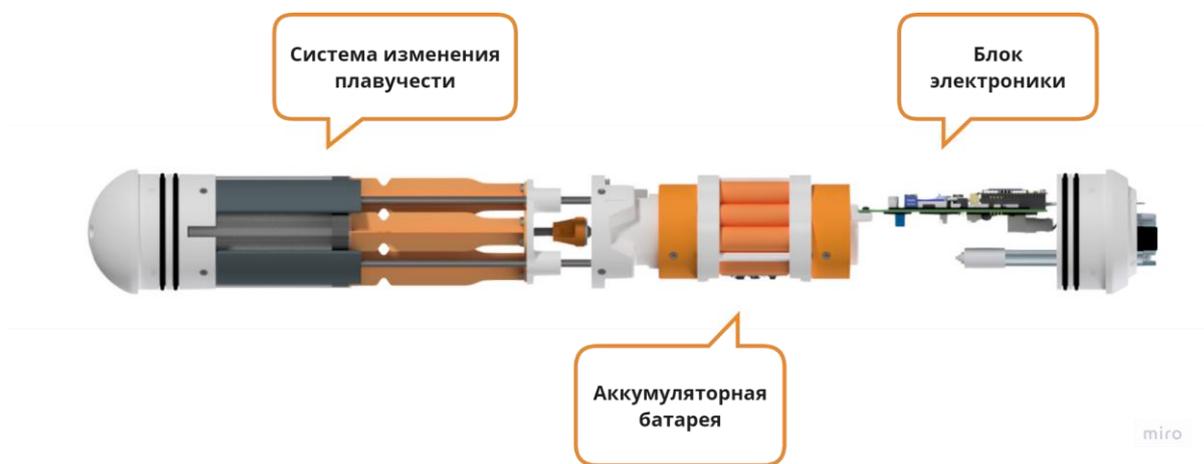


Рисунок 46 — Компоновка зонда

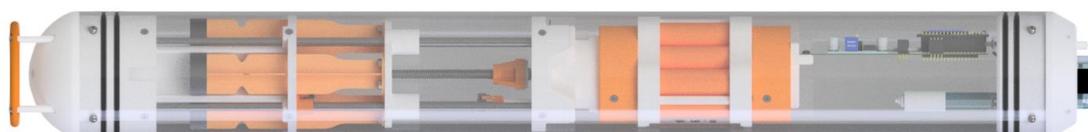


Рисунок 47— 3D-модель устройства с внешним корпусом

### 2.1.2 Разработка корпуса

Верхняя часть корпуса представляет собой конусообразную крышку с плоским фланцем для размещения средств связи и датчиков. Прочный корпус выполнен из акриловой трубы внешним диаметром 90 мм, толщиной стенок 3 мм и длиной 690 мм. Нижняя часть корпуса выполнена в виде сферической крышки. Герметизация трубы осуществляется посредством установки в крышки радиального уплотнения, состоящего из двух резиновых колец по ГОСТ 9833-73 размера 078-084-36. Обтекатели крепятся к корпусу винтами. Модель прочного корпуса устройства представлена на рисунке 48:



Рисунок 48— Прочный корпус зонда

### 2.1.3 Разработка системы изменения плавучести

Одним из основных узлов зонда является СИП (см. рис. 49-50).

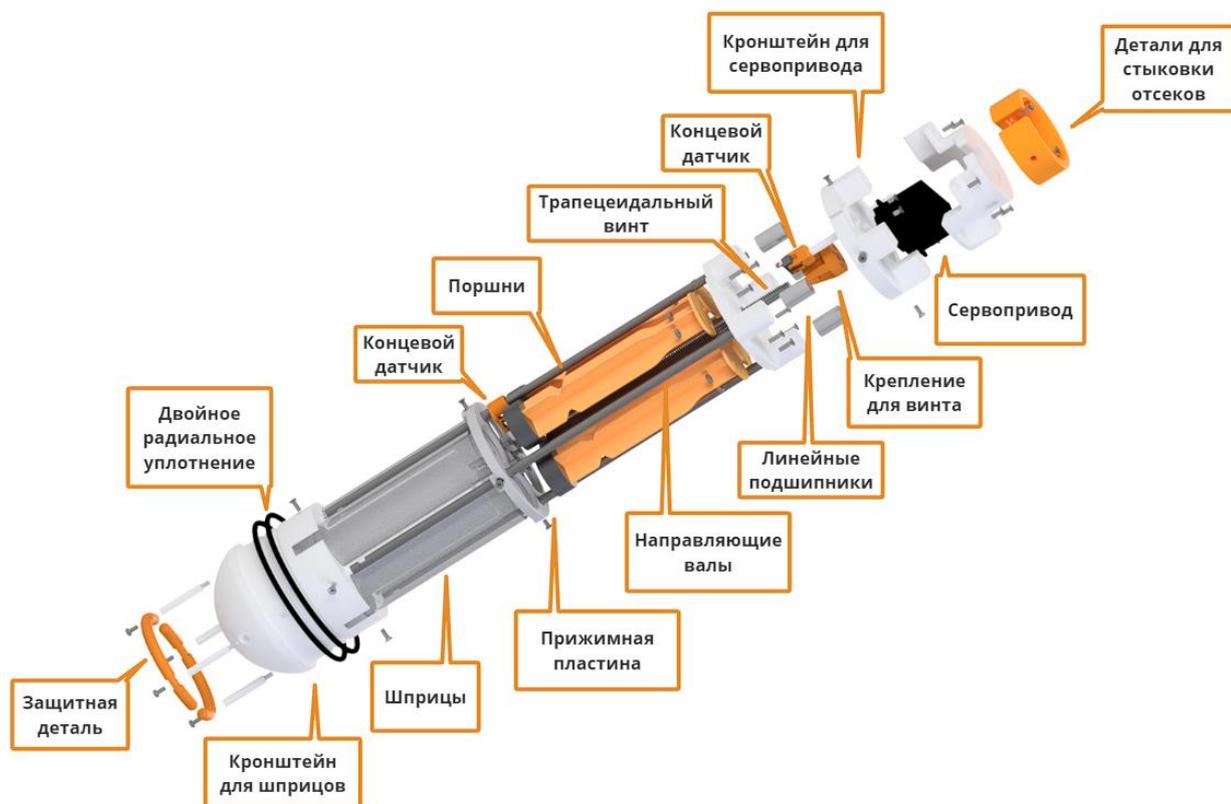


Рисунок 49 — Компоновка СИП



Рисунок 50— 3D-модель СИП

В разрабатываемом устройстве в качестве балластной емкости выступают шприцы суммарном объемом 200 мл, которые зафиксированы в нижней крышке при помощи эпоксидного клея. Решение объединить элемент корпуса и крепление для шприцов в одну деталь обусловлено необходимостью обеспечения герметичности изделия, так как при такой конфигурации заборная вода поступает в балластную емкость напрямую через отверстия в нижней крышке.

Для позиционирования шприцов также была разработана прижимная пластина (см. рис. 51), которая прикреплена к нижней крышке и валам с лысками при помощи винтов.



Рисунок 51 — Прижимная пластина для шприцов

Для перемещения поршней вдоль вертикальной оси была реализована передача «винт-гайка» (см. рис. 52), которая преобразует вращательное движение трапецеидального винта, прикрепленного к сервоприводу, в поступательное движение кронштейна, к которому при помощи винтов присоединены гайка и поршни.



Рисунок 52— Передача «винт-гайка»

В ходе работы над проектом компоновка узла претерпела изменения и имеет две итерации. В первом прототипе устройства работа сервопривода ограничивалась показаниями двух

датчиков Холла, расположенных на креплениях для сервопривода и шприцов соответственно (см. рис. 53): кронштейн для поршней с магнитом поднимается (опускается), пока значения датчика не достигнут критических, соответствующих верхнему и нижнему положениям поршней. Однако при проведении стендовых испытаний были выявлены недостатки системы. Силы сцепления магнита с учетом габаритных ограничений (диаметр до 10 мм) не хватило для срабатывания датчиков.

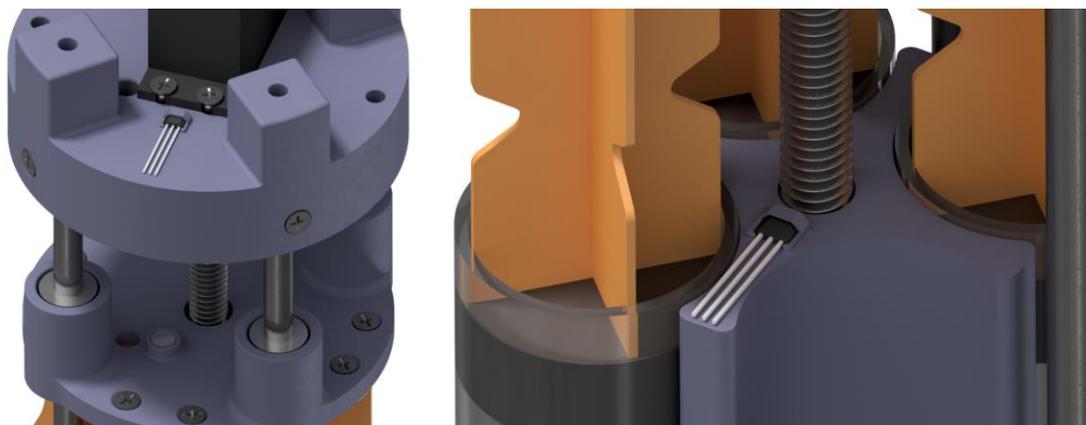


Рисунок 53— Расположение датчиков Холла и магнита

В следующем прототипе было принято решение перейти к использованию механических концевых датчиков (см. рис. 54). Этот способ позволяет обеспечить надежность срабатывания системы. Датчики располагаются на прижимной пластине для шприцов и креплении для сервопривода.



Рисунок 54 — Расположение механических концевых датчиков

Для фиксации продольного габарита БС и обеспечения соосности модуля в конструкцию были добавлены направляющие валы (см. рис. 55). Позиционирования элементов осуществляется при помощи винтов и лысок на валах.

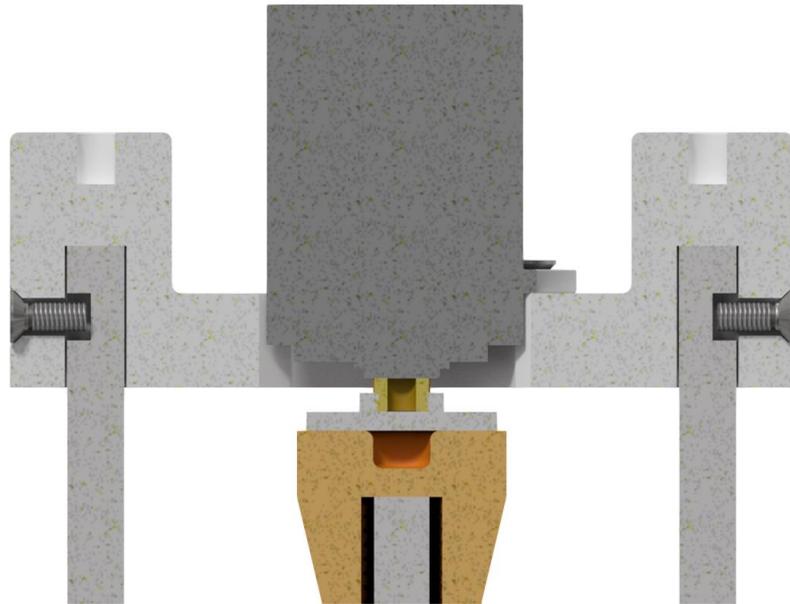


Рисунок 55— Направляющие валы

В целях избежания прямого соударения изделия с дном водоема были разработаны детали (см. рис 56), которые крепятся к нижней крышке при помощи стоек. Для амортизации на них будут надеты трубки из вспененного полиэтилена.



Рисунок 56— Крепление для шприцов (нижняя крышка)

#### 2.1.4 Разработка аккумуляторной кислотной батареи

В ходе работы над данным узлом был произведен расчет энергопотребления, в результате которого было выявлено, что для отработки устройством 100 циклов необходимо 24 литий-ионных батарей 18650. Одним из основных концептов устройства является модульность, поэтому

было принято решение разработать блоки АКБ (см. рис. 57-58) 2S6P (буква S указывает на количество последовательно соединенных батарей, а P — параллельно соединенных), которые можно будет подключать параллельно для увеличения емкости. С целью контроля процесса заряда АКБ, индивидуального контроля зарядного процесса и балансировки будет подключена плата BMS.

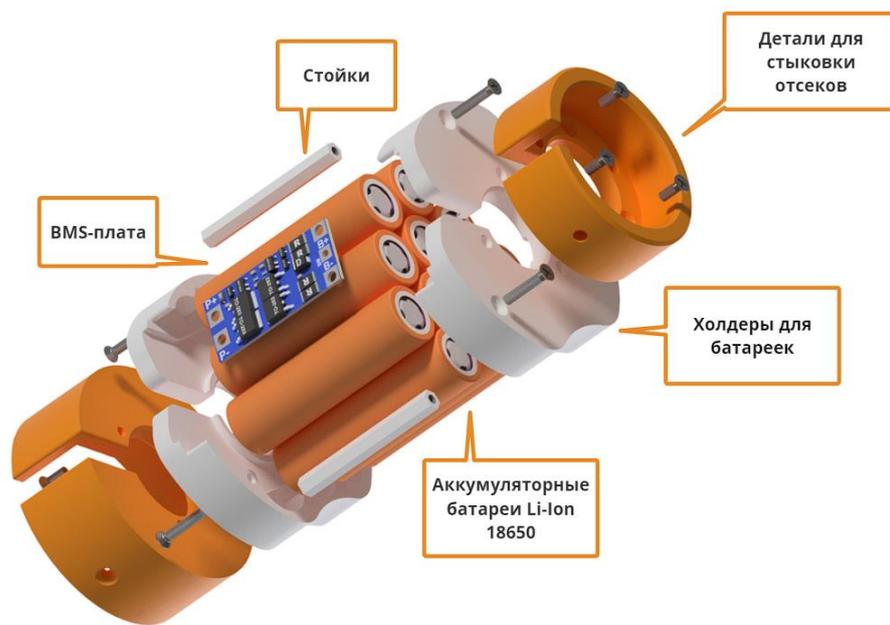


Рисунок 57 — Компоновка АКБ



Рисунок 58 — 3D-модель АКБ

По обе стороны от сборки батарей располагаются холдеры (см. рис. 59), соединенные между собой стойками, в которых предусмотрены пазы для проводки, а также сквозные отверстия, чтобы беспрепятственно отсоединять электронную часть модуля от конструктивной.



Рисунок 59— Крепления для АКБ

Соединение аккумуляторных батарей происходит как при помощи точечной сварки с использованием никелевой ленты, так и посредством пайки проводов. На рисунках 60-62 приведена инструкция по сборке конфигурации 2S6P.

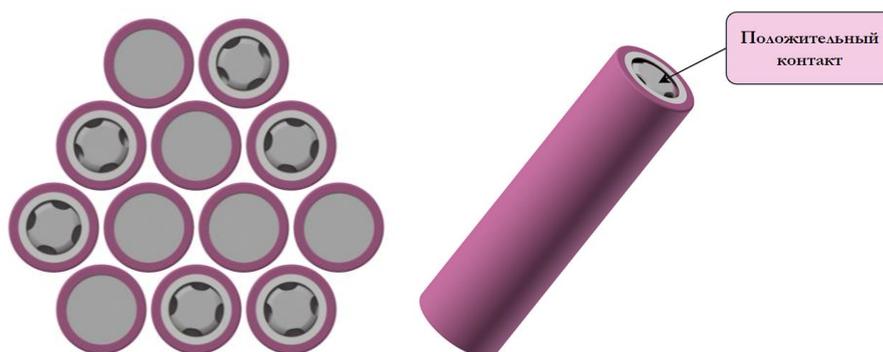


Рисунок 60 — Сборка батарей для конфигурации 2S6P

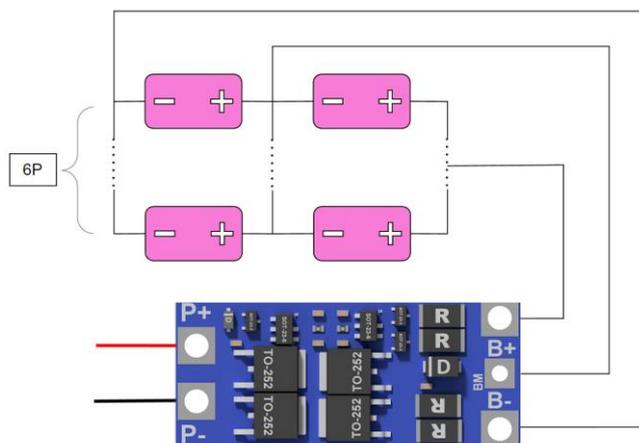


Рисунок 61 — Монтажная схема 2S6P



Рисунок 62 — Схема пайки сборки 2S6P

### 2.1.5 Разработка блока электроники

В ходе работы над проектом была разработана процессорная печатная плата (см. рис. 63-64) для микроконтроллера, драйверов датчиков и других электронных компонентов.

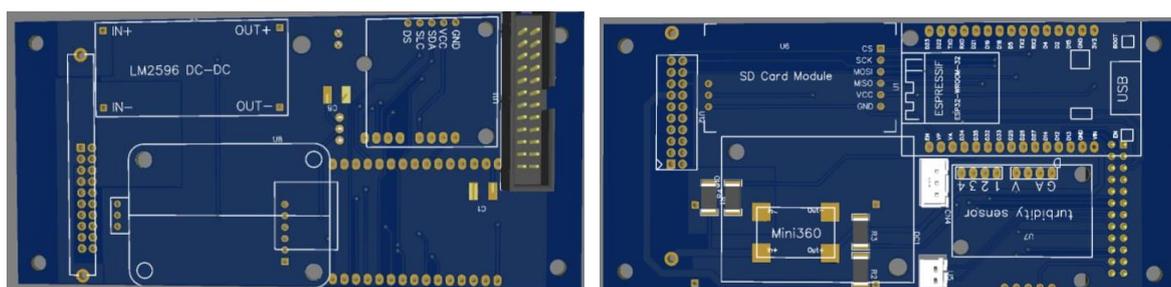


Рисунок 63 — Процессорная печатная плата

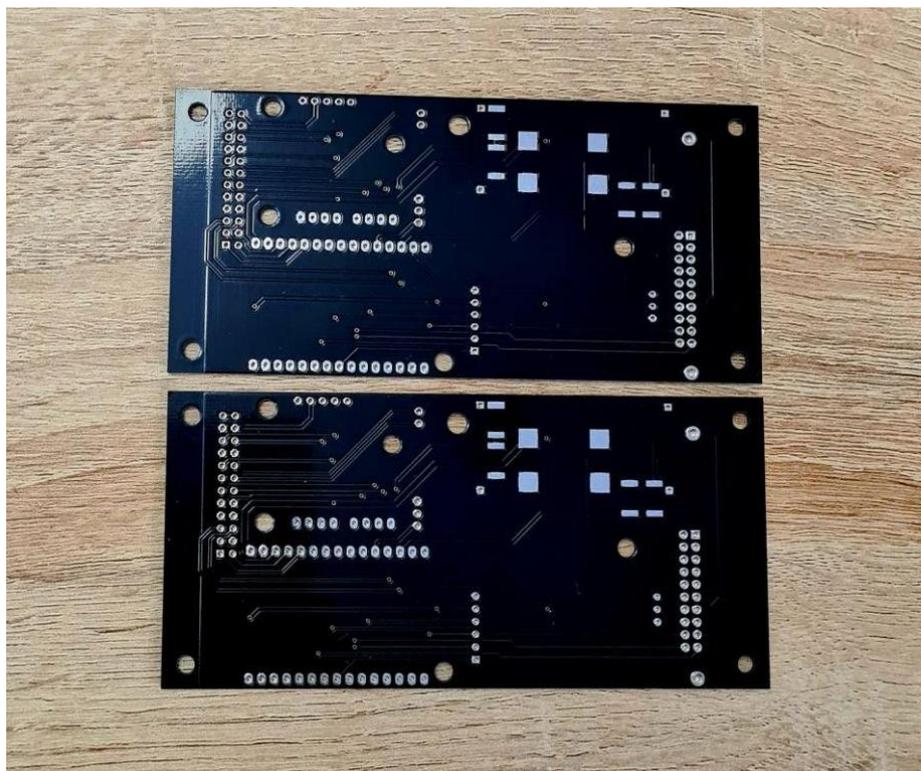


Рисунок 64 — Изготовленная печатная плата

Для крепления платы был спроектирован кронштейн, к которому она присоединяется винтами. Модель представлена на рисунке 64.



Рисунок 64— 3D-модель блока электроники

Для расположения датчиков и средств связи используется верхняя часть корпуса (см. рис. 65). Каждый элемент крепится в конусообразную крышку при помощи эпоксидного клея.



Рисунок 65— Расположение датчиков в верхнем обтекателе

#### 2.1.6 Разработки универсальных стыковочных элементов

Одним из основных концептов устройства является модульность, то есть пользователь в зависимости от своих требований имеет возможность менять компоновку, например, для увеличения продолжительности работы зонда может быть добавлен дополнительный блок АКБ.

В связи с этим было разработано 3 концепта универсальной стыковки отсеков: винтовое, байонетное, резьбовое соединения.

1) Винтовое соединение (см. рис. 66)

Крепление осуществляется при помощи 3 винтов. Данный способ проще всех в реализации, однако ведет к увеличению времени стыковки отсеков.



Рисунок 66— Винтовое соединение

2) Байонетное соединение (см. рис. 67)

Состоит из детали с 2 выступами (штифтами) (неподвижная деталь), детали с 2 пазами (подвижная деталь) и детали, прижимающей ее к модулю и обеспечивающей подвижность. Крепление происходит посредством осевого перемещения и поворота одной детали относительно другой. Пока данный концепт еще прорабатывается, так как требуется найти способ препятствования разъединению деталей. Обеспечивает простой процесс сборки.

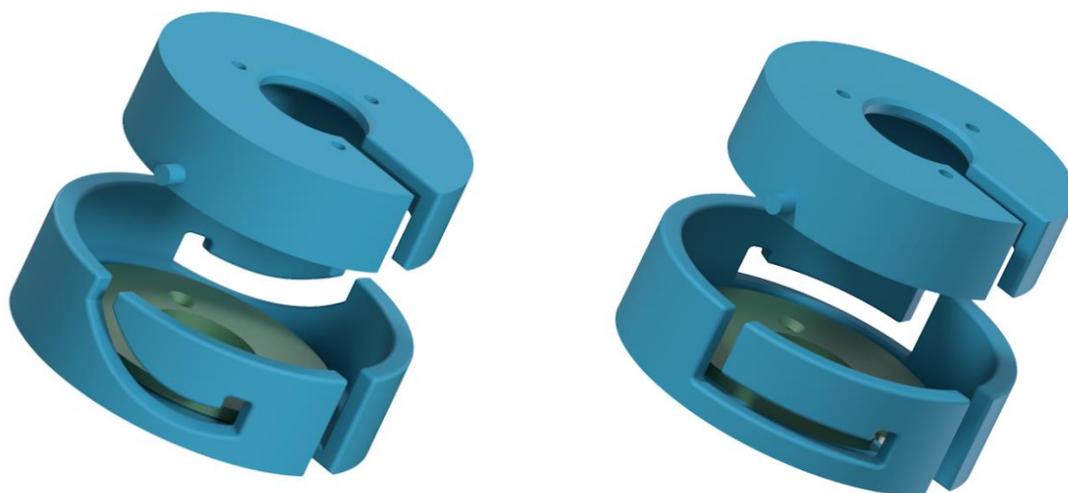


Рисунок 67— Варианты байонетных соединений

3) Резьбовое соединение (см. рис. 68)

Состоит из подвижной детали с внутренней резьбой, детали, прижимающей ее к модулю, и неподвижной детали с внешней резьбой. Обеспечивает простой процесс сборки, однако при 3D-печати возможно возникновение дефектов у деталей.

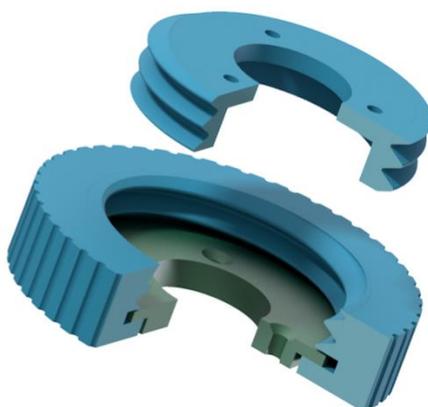


Рисунок 68— Резьбовое соединение

На данный момент в первом прототипе используется винтовое соединение, однако при проработке дальнейших концептов планируется использование байонетного или резьбового соединения для упрощения процесса сборки.

Для соединения электронных компонентов и проводки кабелей были разработаны печатные платы, на которых располагаются информационные и силовые разъемы (см. рис. 69).

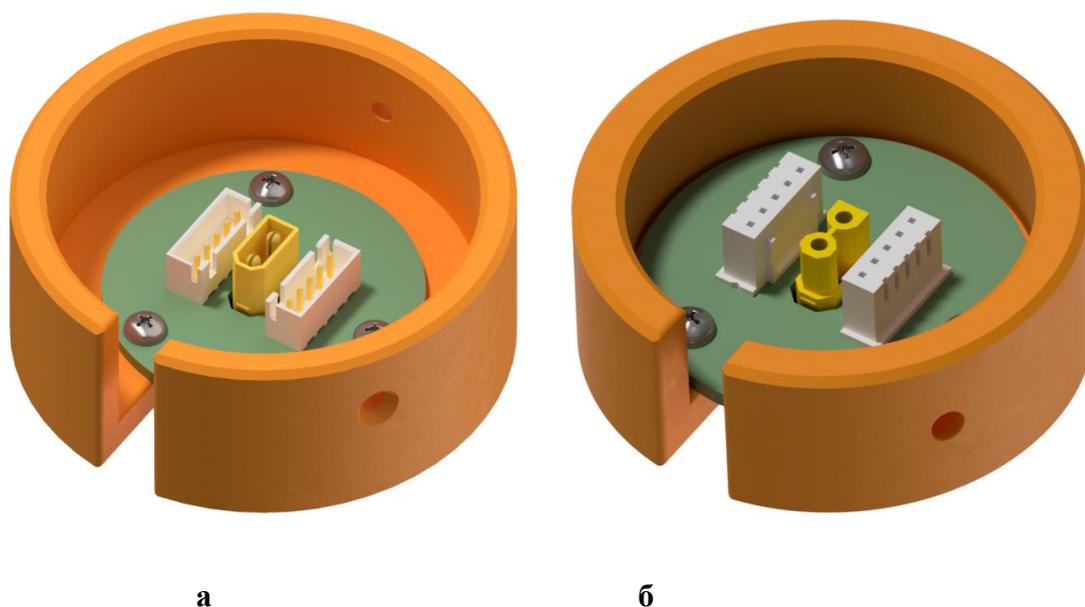


Рисунок 69— Макетные платы с разъемами на примере винтового соединения:

*a* — разъемы папа; *б* — разъемы мама

### 2.1.7 Генеративное моделирование

Одной из задач, которую планируется реализовать в дальнейшем, является создание модели устройства с использованием генеративного моделирования. Целью генеративного моделирования является оптимизация массы модели на основе ее геометрии, приложенных нагрузок и ограничений, заданных пользователем. При этом получаемый компонент удовлетворяет всем механическим и производственным требованиям.

В проведенном исследовании была поставлена цель оптимизировать модель, сохраняя наилучшее отношение жесткости к массе. Пока данный способ моделирования был протестирован только на одной детали, в дальнейшем планируется провести исследование для всего устройства. На рисунке 70 представлена 3D-модель детали до применения генеративного моделирования.

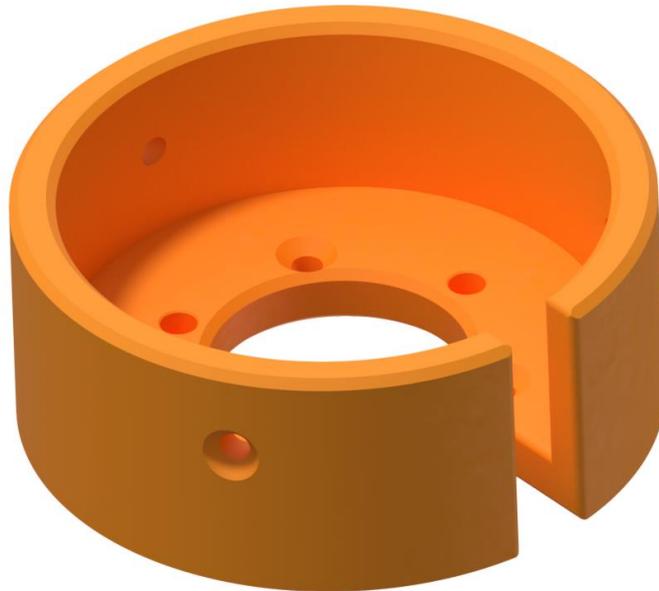


Рисунок 70 — Деталь до применения генеративного моделирования

В результате исследования программой была сгенерирована новая деталь, масса которой составляет 55% от исходной. На рисунках 71 и 72 представлены сглаженная новая деталь и сетка соответственно.



Рисунок 71— Деталь после применения генеративного моделирования (Сглаженная)

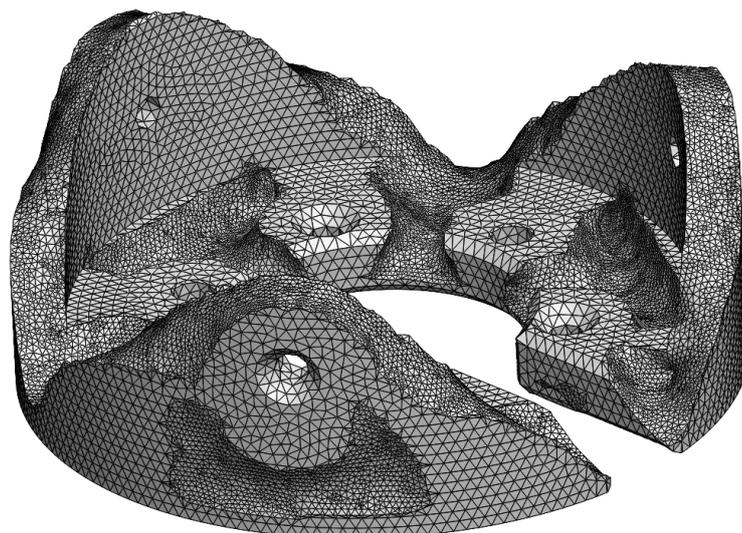


Рисунок 72— Деталь после применения генеративного моделирования (Сетка)

Для 3D-печати полученной модели необходимо отредактировать изначальную деталь (см. рис. 73), опираясь на сетку, сгенерированную в результате работы программы.

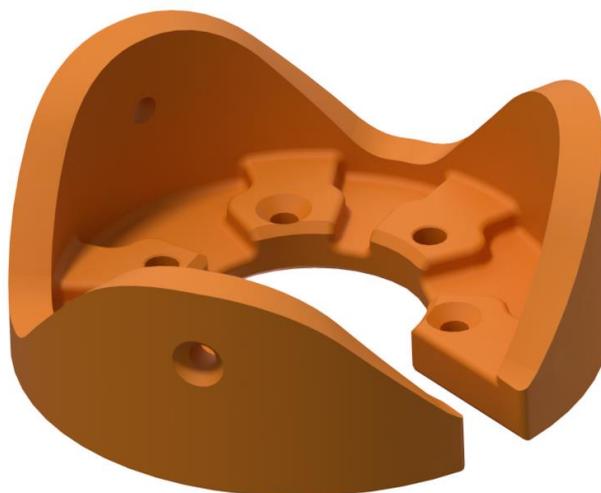


Рисунок 73— Окончательный вариант детали

Для демонстрации результатов исследования детали, соответствующие каждому этапу моделирования, были изготовлены с использованием FDM-печати.



**а**

**б**

**в**

Рисунок 74 — Этапы генеративного моделирования:

*а* — до обработки ; *б* — после генеративного моделирования; *в* — отредактированная деталь

В дальнейшем планируется провести прочностной расчет, чтобы выяснить, удовлетворяет ли полученная деталь всем механическим и производственным требованиям.

## 2.2 Прототипирование

В результате выполнения работы создан первый прототип дрейфующего зонда (см. рис. 75).

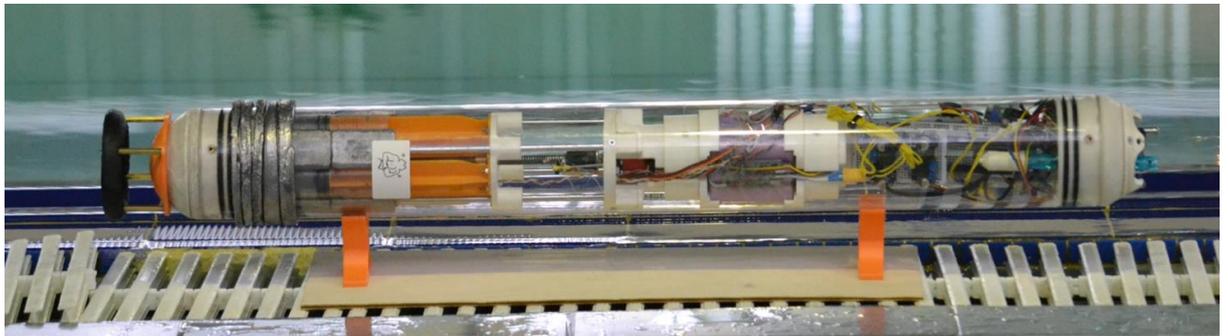


Рисунок 75 — Первый прототип автономного зонда

### 2.2.1 3D-печать

Большая часть спроектированных деталей была изготовлена при помощи аддитивных технологий 3D-печати. Детали, к которым предъявлялись повышенные требования к герметичности, были напечатаны с применением фотополимерных SLA технологий (см. рис. 76-77). Опорные детали были напечатаны с применением FDM технологий (см. рис. 78-79).

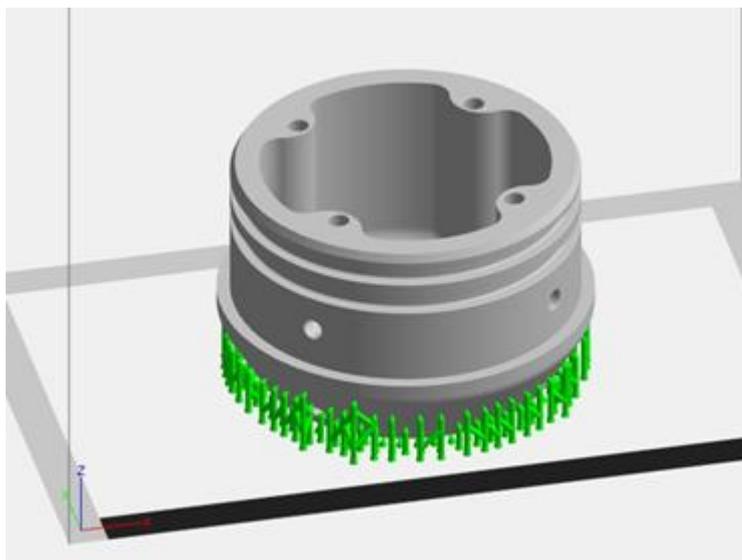


Рисунок 76 — Подготовка деталей к SLA-печати

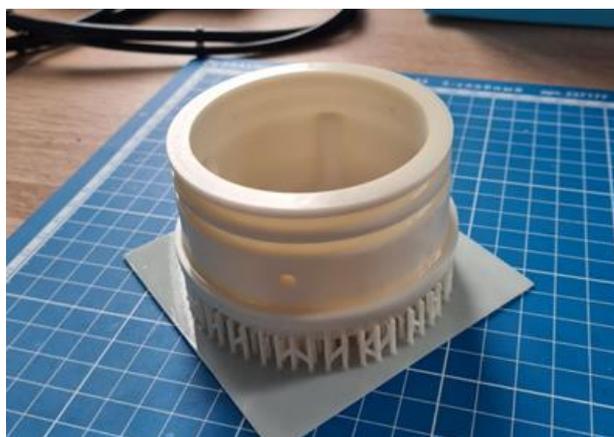


Рисунок 77 — Детали, изготовленные при помощи SLA-печати

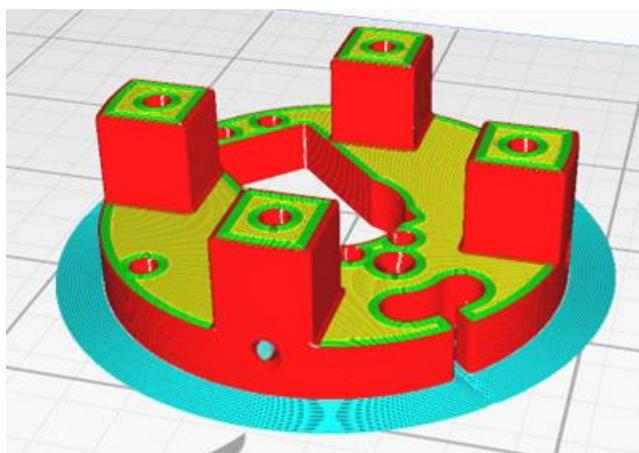


Рисунок 78 — Подготовка деталей к FDM-печати



Рисунок 79 — Детали, изготовленные при помощи FDM-печати

### 2.2.2 Изготовление свинцовых грузов

В процессе эксплуатации устройства возможно возникновение внешних сил, выводящих изделие из положения равновесия, соответствующего вертикальному положению тела. В воде на тело действуют следующие силы (см. рис. 80): сила тяжести, приложенная к центру масс (точка G), и сила Архимеда, приложенная к центру тяжести объема жидкости, вытесненной телом (центр величины) (точка C).

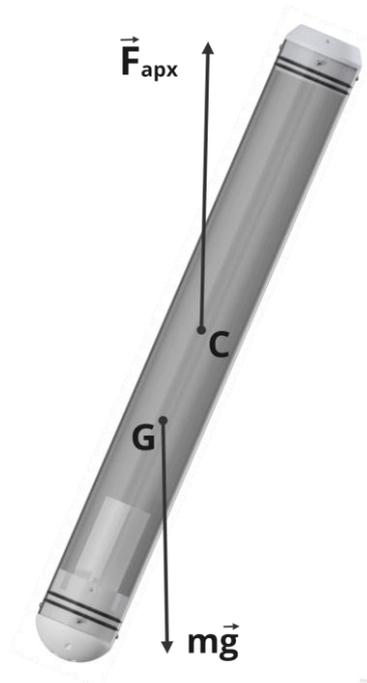


Рисунок 80 — Силы, приложенные к телу в воде

Примерное расположение точек С и G представлено на рисунке 81.

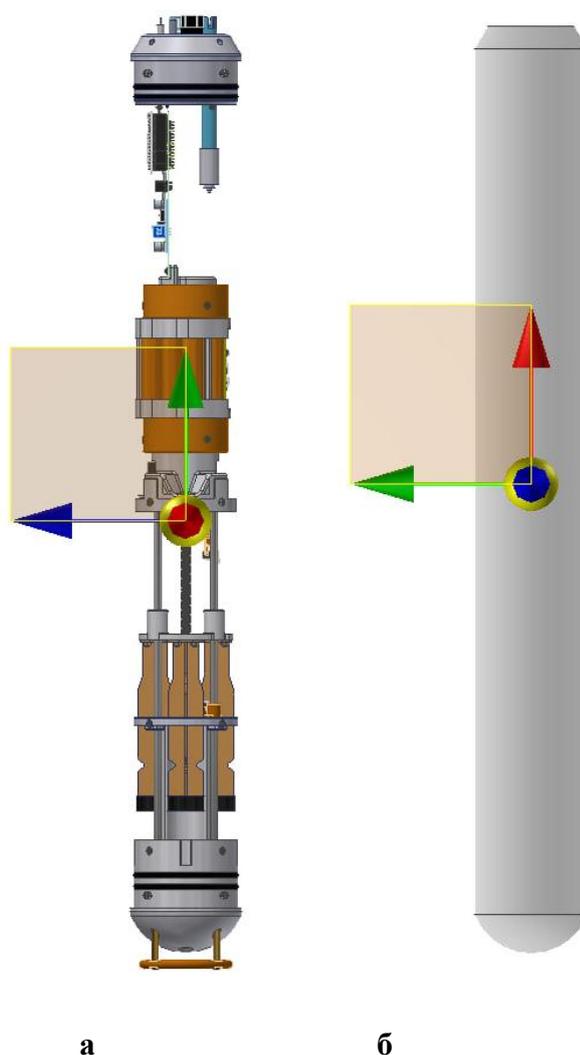


Рисунок 81— Расположение центра тяжести устройства (а) и центра величины (б)

Когда центр величины располагается выше центра тяжести, при отклонении устройства от положения равновесия сила Архимеда и сила тяжести создают возвращающий момент относительно точки С. Для избежания опрокидывания зонда на бок под воздействием внешних сил, было принято решение увеличить момент силы тяжести, сместив центр масс вниз. С этой целью были разработаны свинцовые грузы, расположенные в нижней части устройства. Процесс их изготовления представлен на рисунках 82-87.



Рисунок 82 — Расположение грузов



Рисунок 83 — Изготовленные мастер-модели



Рисунок 84 — Подготовка свинца для литья

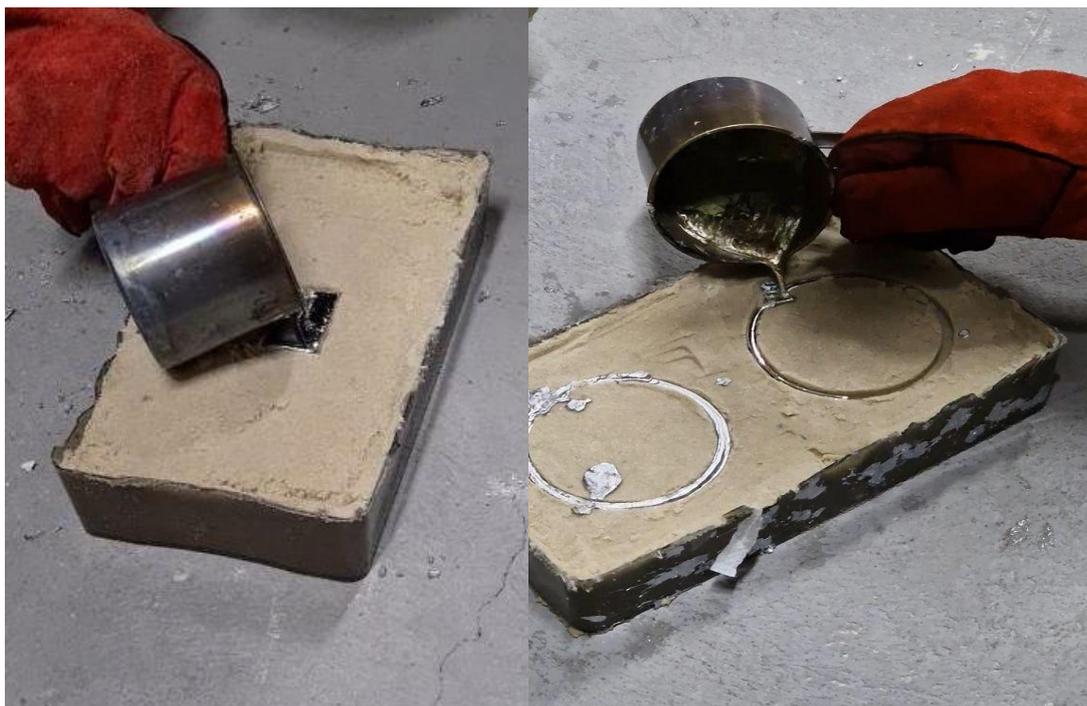


Рисунок 85 — Процесс литья свинцовых грузов

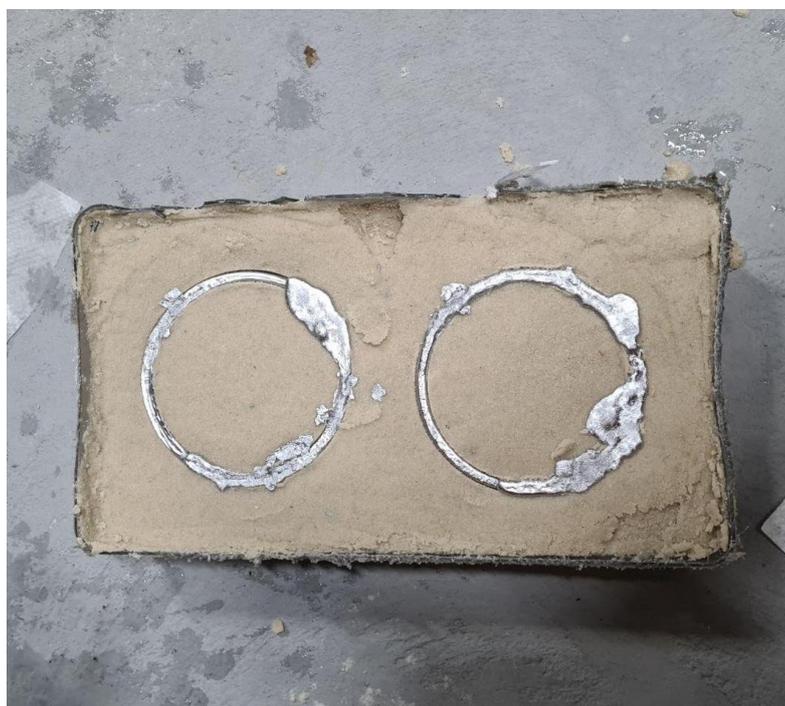


Рисунок 86 — Результат литья свинцовых колец



Рисунок 87— Свинцовые кольца после обработки

### 3. СХЕМОТЕХНИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

#### 3.1 Определение компонентной базы

Для управления системой и обработки данных с датчиков был выбран микроконтроллер ESP-WROOM-32-30PIN (см. рис. 88). Данный микроконтроллер имеет в сумме 30 пинов, из которых 12 аналоговых пинов с АЦП, а также 10 цифровых пинов, два из которых относятся к интерфейсу I2C, по паре пинов – к интерфейсу UART, оставшиеся 4 – к интерфейсу VSPI. Потребляемое напряжение – 5В, максимально потребляемый ток – 500мА.

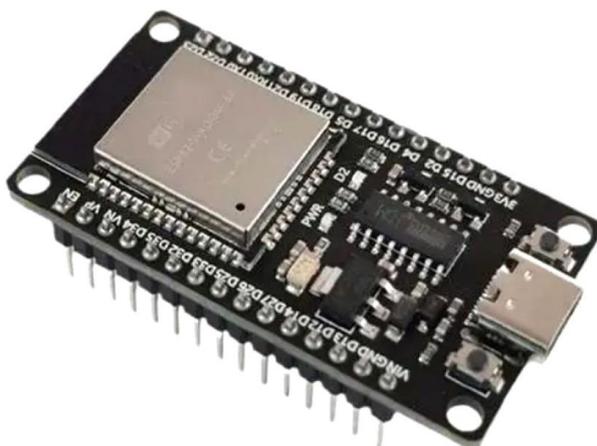


Рисунок 88 — Микроконтроллер ESP-WROOM-32

Для получения данных о свойствах воды используются 5 датчиков, представленных в таблице 6 и на рисунке 89: датчик давления, датчик температуры, датчик мутности, PH- и TDS/ЕС-метры.

Таблица 6 — Выбранные датчики с их характеристиками

Датчик	Модель	Характеристики
PH-метр	DFRobot PH-Sensor v1.1	Напряжение питания: 5В Потребляемый ток: 25 мА

		<p>Диапазон измерений: 10-14 pH</p> <p>Погрешность измерений: 0,1 pH</p>
TDS/EC-метр	DFRobot TDS/EC-Sensor v1.0	<p>Напряжение питания: 3.3 – 5В</p> <p>Потребляемый ток: 3 – 6 мА</p> <p>Диапазон измерений: 0 – 1000 ppm</p> <p>Погрешность измерений: ±10%</p>
Датчик мутности	TSW-20M	<p>Напряжение питания: 5В</p> <p>Потребляемый ток: 11 мА</p> <p>Диапазон измерений: 0 – 4000 ЕМФ</p> <p>Погрешность измерений: ±3.5%</p>
Датчик давления	MS5837-30BA	<p>Напряжение питания: 1.5 – 3.6 В</p> <p>Потребляемый ток: 6 мкА</p> <p>Диапазон измерения: 0 – 30 бар</p> <p>Погрешность измерений: 5%</p>
Датчик температуры	DS18B20	<p>Напряжение питания: 3 – 5.5 В</p> <p>Потребляемый ток: 1 мА</p> <p>Диапазон измерений: -55 – 125 °С</p> <p>Погрешность измерений: 0.5 °С</p>

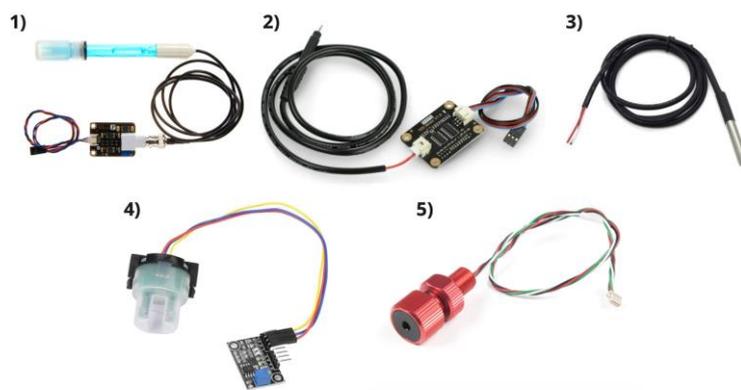


Рисунок 89 — Датчиковое оснащение в отсеке электроники

1 - PH-метр DFRobot PH-Sensor v1.1; 2 - TDS/EC-метр DFRobot TDS/EC-Sensor v1.0; 3 - Датчик температуры DS12B20; 4 - Датчик мутности TSW-20M; 5 - Датчик давления MS5837-30BA

Для погружения и всплытия устройства была разработана СИП, состоящая из сервопривода постоянного вращения TIANKONGRC TD-8125MG (Напряжение питания: 5 – 8В, максимально потребляемый ток: 500мА, момент силы: 30 кг\*см) (см. рис. 90) и двух концевых датчиков MS-1A-14.5-P (см. рис. 90) (Максимальное напряжение: 125В, максимальный ток: 1А).

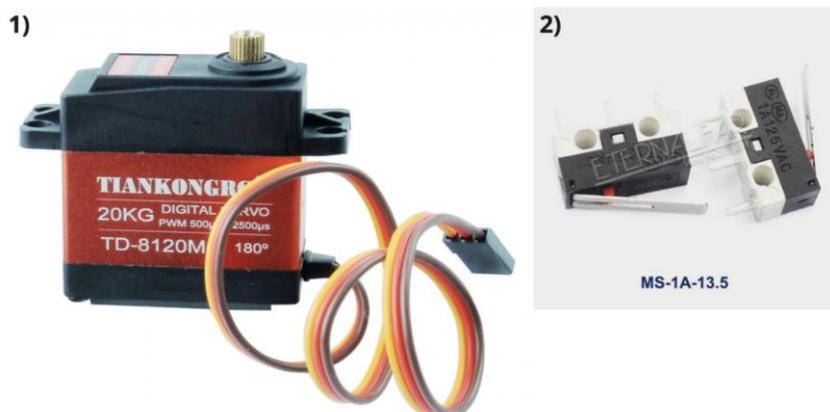


Рисунок 90 — Компоненты СИП

1 - Сервопривод постоянного вращения TIANKONGRC TD-8125MG; 2 - Концевые датчики MS-1A-14.5-P

Для сохранения данных с датчиков используется модуль MicroSD-карты.

Для отслеживания времени снятия данных используется модуль RTC DS1307.

Для отслеживания местоположения устройства используется GPS-модуль NEO-6M.

Источник питания цепи - модуль АКБ, который состоит из 12 подключенных литий-ионных батарей 18650, подключенных по схеме 2S6P для того, чтобы обеспечить нужное

напряжение при максимальной емкости. Также в каждой сборке имеется плата BMS — устройство для контроля состояния батареи и предотвращения ее работы в нештатном режиме. BMS следит за основными параметрами литиевого аккумулятора — температурой и напряжением. Если один из них выходит за допустимые пределы, батарея отключается от потребителя. Таким образом, плата BMS предотвращает глубокий разряд, перезаряд или перегрев АКБ.

В цепи подключены два понижающих преобразователя напряжения с выходным напряжением по 5В в каждом:

- понижающий DC-DC преобразователь LM2596 — используется для питания сервоприводов, концевых датчиков, понижает до 5В;
- понижающий DC-DC преобразователь Mini360 — используется для питания всех датчиков, понижает до 5В.

В данном случае используется отдельное питание для сервопривода и датчиков во избежание сбоев в работе последних. Для некоторых датчиков дополнительно стоят стабилизаторы напряжения на 3.3В AMS1117).

### 3.2 Разработка печатных плат

Для облегчения размещения плат для датчиков и модулей и обеспечения большей надежности соединения было принято решение разработать печатные платы. Печатные платы сводят к минимуму риск совершения ошибок в процессе сборки, делают монтаж проще и быстрее, улучшают теплоотвод внутри системы, а также гарантируют стабильность и точность работы устройства.

#### 3.2.1 Разработка процессорной печатной платы

##### 3.2.1.1 Создание схемы электрической принципиальной (ЭЗ)

Схема электрическая — документ, содержащий в виде условных изображений или обозначений составные части изделия, действующие при помощи электрической энергии, и их взаимосвязи (ГОСТ 2.702—2011). На рисунке 91 представлена принципиальная схема процессорной печатной платы.

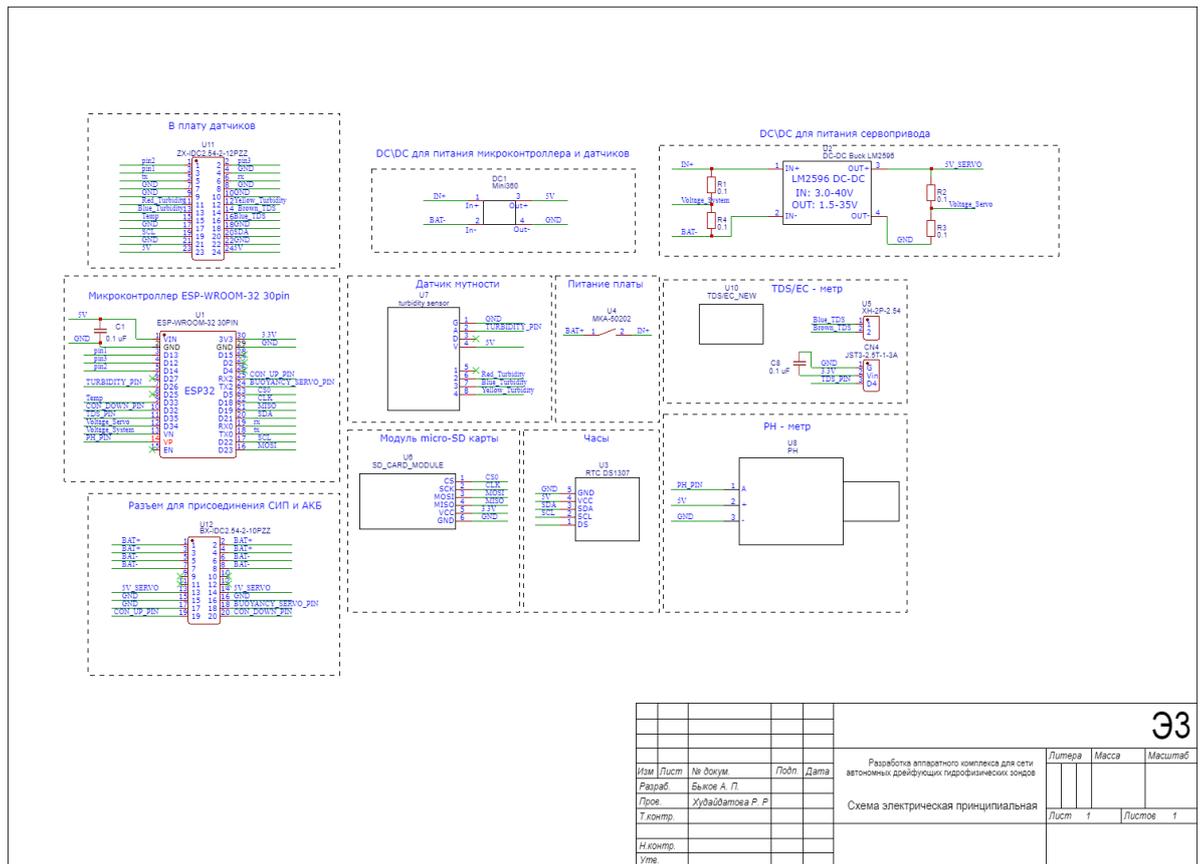


Рисунок 91 — ЭЗ процессорной печатной платы

На данной схеме показаны такие функциональные узлы, как:

- разъем для соединения с платой датчиков на 24 пина;
- датчик мутности;
- TDS/EC-метр и конденсатор 0.1 мкФ;
- датчик кислотности (рН-метр);
- разъем для присоединения СИП на 20 пинов;
- два понижающий преобразователя напряжения на 5В;
- модуль RTC;
- геркон;
- микроконтроллер.

### 3.2.1.2 Компоновка процессорной печатной платы

Исходя из ограничений размеров конструкции было принято решение сделать плату прямоугольной формы для возможности размещения на ней всех модулей электрических компонентов. Имеет четыре крепежных отверстия (см. рис. 92).

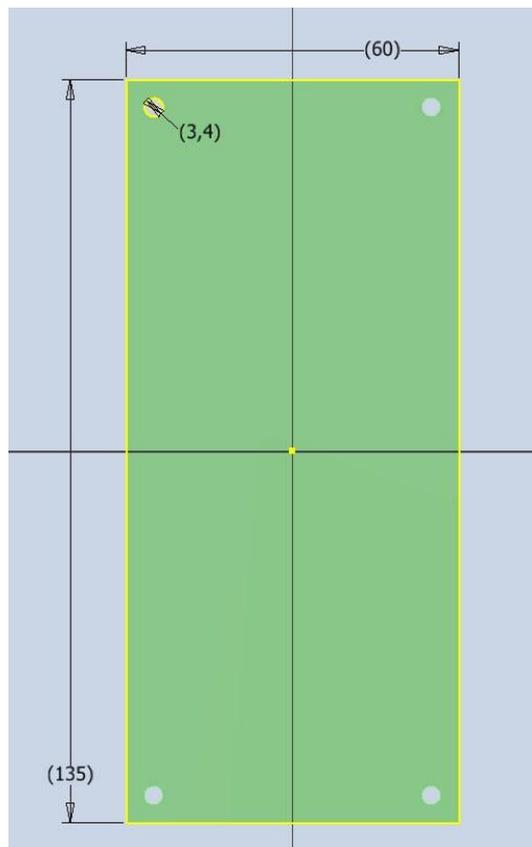


Рисунок 92 — Размеры процессорной печатной платы

Габариты и размеры платы:

- длина: 135 мм;
- ширина: 60 мм;
- диаметр крепежных отверстий: 3.5 мм.

Контроллер расположен в верхней части платы для удобства разводки и возможности подключения к ней при надобности без полного разбора устройства. Разъемы для шлейфов расположены по краям для удобства подключения.

3D-вид процессорной печатной платы представлен на рисунках 93.

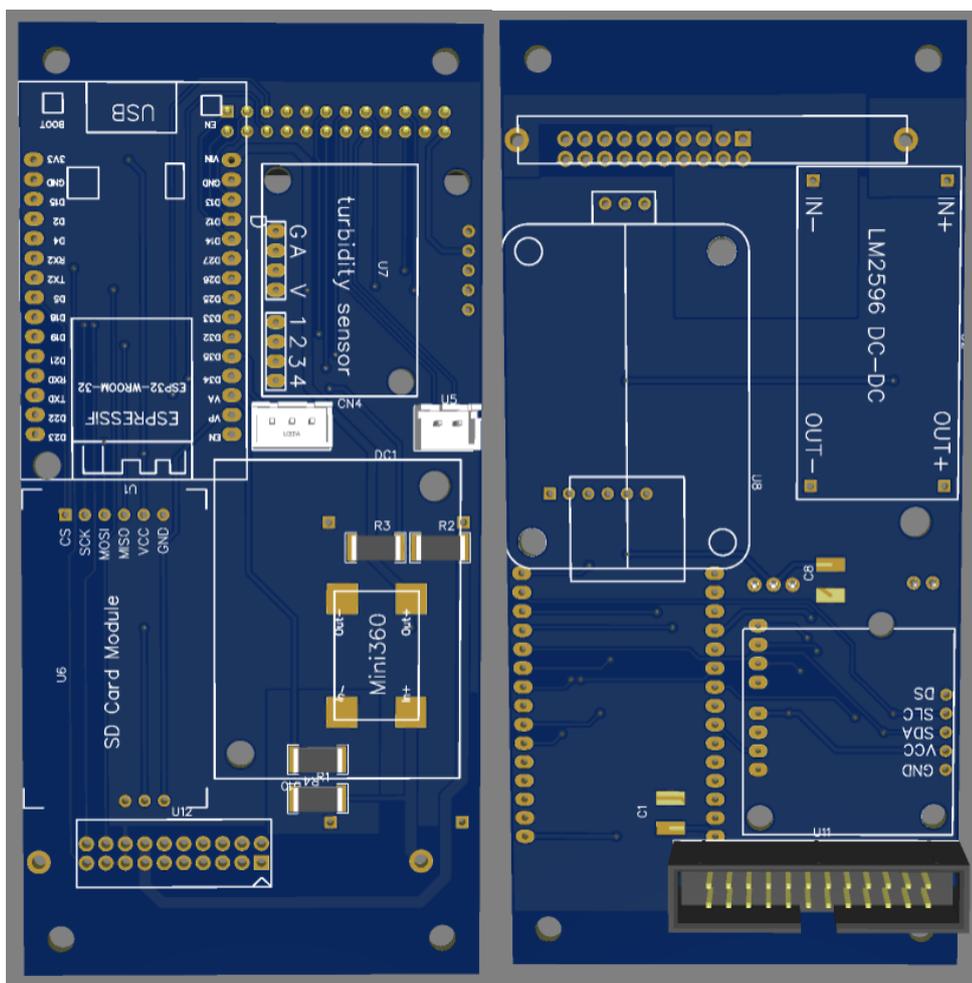


Рисунок 93 — 3D-вид процессорной печатной платы

### 3.2.1.3 Трассировка процессорной печатной платы

Для трассировки рассматриваемой платы были произведены расчеты ширины дорожек с использованием специального онлайн-калькулятора. Для дорожек питания рекомендуемая ширина составляет от 0.5 мм. Для сигнальных дорожек – минимум 0.2 мм. Данная плата имеет два слоя, так как имеет сложную компоновку и большое количество электрических компонентов. Основными параметрами платы являются:

- тип материала: стандартный материал для изготовления печатных плат FR4 Tg135;
- толщина фольги: 37 мкм;
- толщина платы: 1.57 мм;
- минимальная ширина зазора на внешних слоях: 0.2 мм;
- пояски контактных площадок: 0.25 мм;
- финишное покрытие контактных площадок: ПОС-63.

Трассировка процессорной печатной платы представлена на рисунке 94.

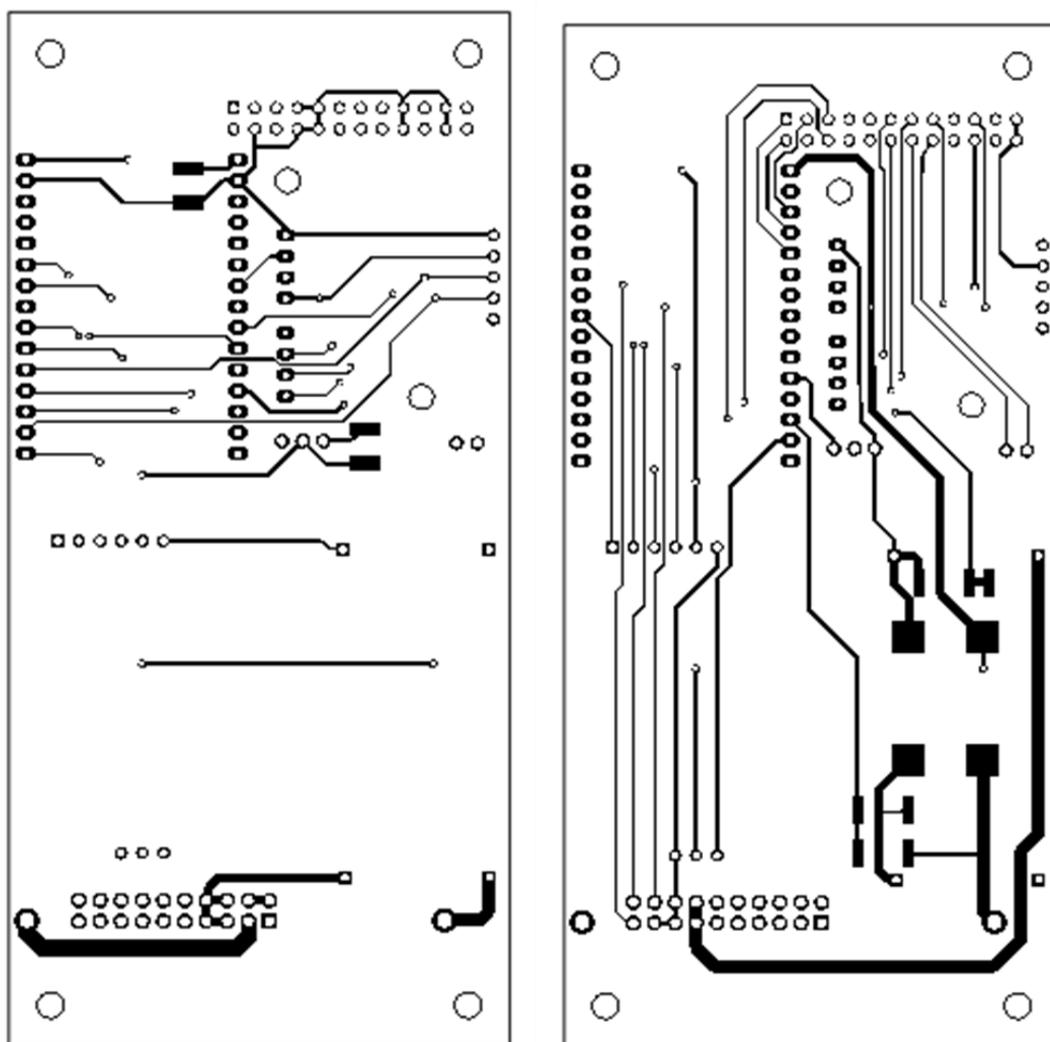


Рисунок 94 — Трассировка процессорной печатной платы

### 3.2.2 Разработка печатной платы для присоединения датчиков

#### 3.2.2.1 Создание схемы электрической принципиальной (ЭЗ)

На рисунке 91 представлена принципиальная схема печатной платы для датчиков.

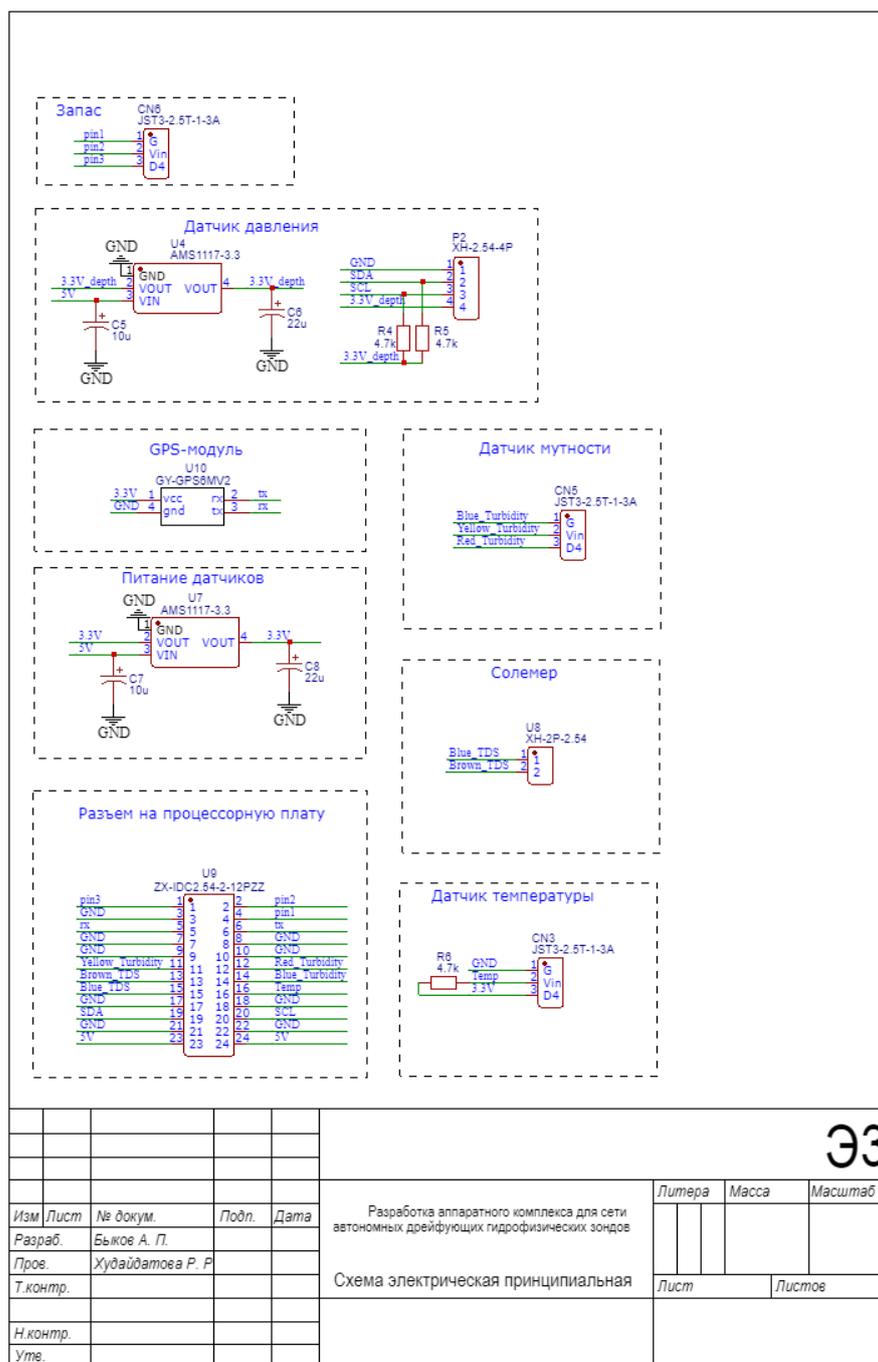


Рисунок 95 — Э3 печатной платы для датчиков

На схеме представлены такие узлы, как:

- питание датчиков, состоящее из стабилизатора напряжения на 3.3В и двух конденсаторов на 10 и 22 мкФ;
- датчик давления, состоящий из отдельного стабилизатора напряжения на 3.3В и двух конденсаторов на 10 и 22 мкФ и разъема JST ХН на 4 пина для присоединения датчика давления с двумя резисторами на 4.7 кОм;

- разъем на процессорную плату на 24 пина;
- запас на 3 пина;
- GPS-модуль;
- датчик мутности;
- солемер (TDS/EC-метр);
- датчик температуры и резистор на 4.7 кОм.

### 3.2.2.2 Компоновка печатной платы для присоединения датчиков

Для уменьшения длины и количества проводов, ведущих от датчиков к микроконтроллеру было принято решение сделать данную плату с переходником, от которого идет шлейф на процессорную печатную плату. Имеет четыре крепежных отверстия (см. рис. 96).

Габариты и размеры платы:

- диаметр: 70 мм;
- диаметр крепежных отверстий: 4 мм.

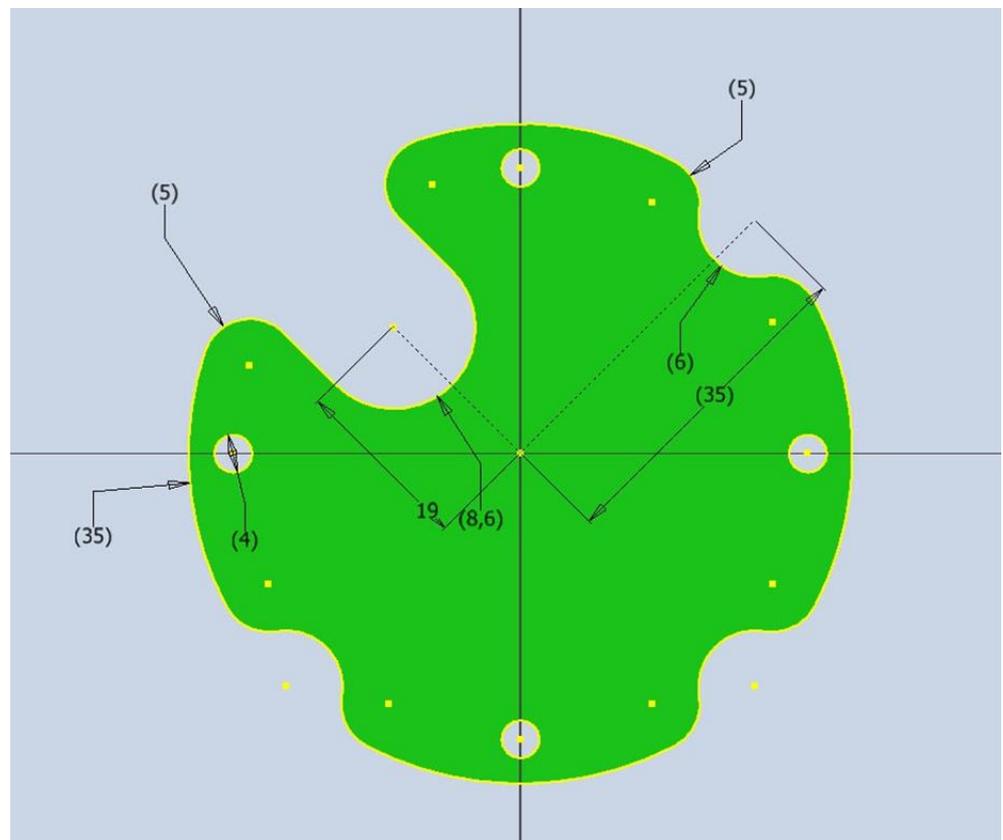


Рисунок 96 — Чертеж печатной платы для подключения датчиков

### 3.2.2.3 Трассировка печатной платы для присоединения датчиков

Данная плата имеет один слой, выполнена по тем же параметрам, что и процессорная печатная плата (см. рис. 97).

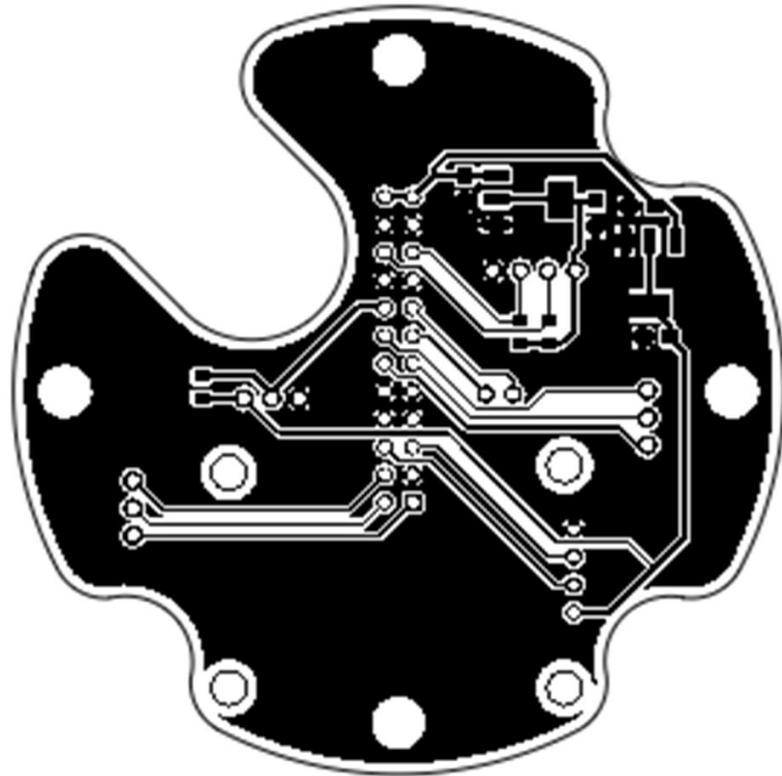


Рисунок 97 — Трассировка печатной платы с датчиками

### 3.2.3 Создание схемы электрической соединений (монтажная, Э4)

Схема соединений — схема, показывающая все устройства и элементы, входящие в состав изделия, их входные и выходные элементы, а также соединения между этими устройствами и элементами (ГОСТ 2.702 - 2011) (см. рис. 98).

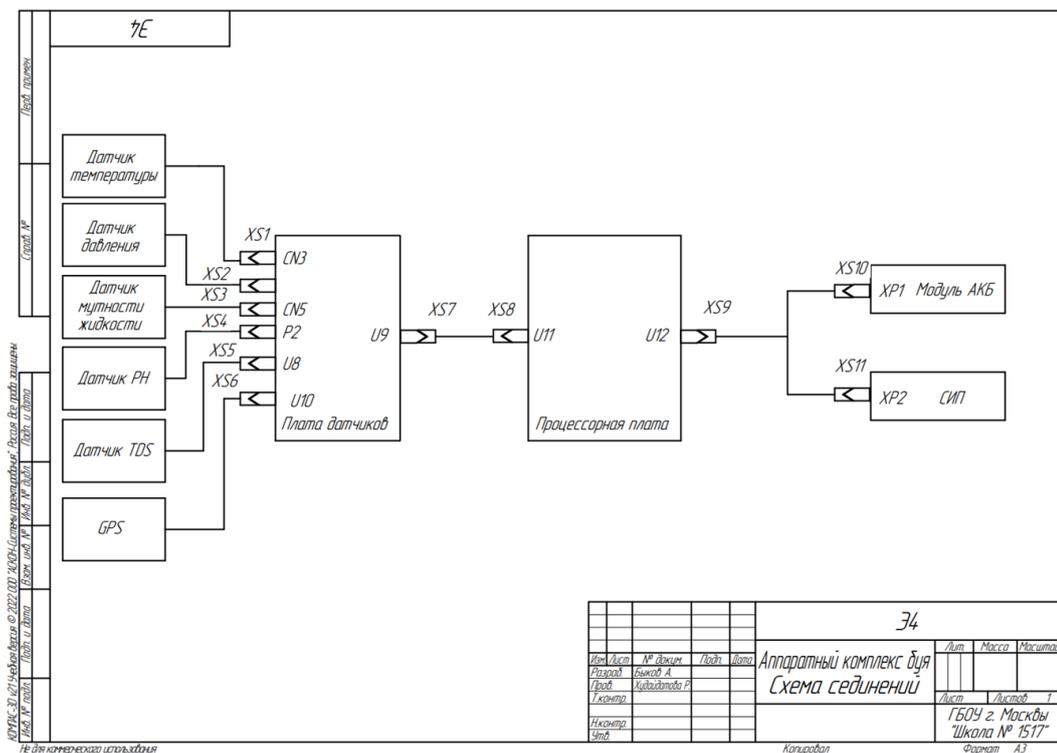


Рисунок 98 — Монтажная схема изделия

### 3.2.4 Создание документации для производства и монтажа печатной платы

На этапе производства печатных плат необходимо подготовить документацию для завода, а именно gerber-файлы. Gerber-файлы представляют собой текстовое описание последовательности команд, направленных на прорисовку различных элементов топологии (контактных площадок, переходных отверстий, сквозных отверстий, слоев) с помощью графопостроителя.

Поскольку проектирование печатных плат осуществлялось в EasyEda, gerber-файлы создаются автоматически и доступны для загрузки (см. рис. 99).

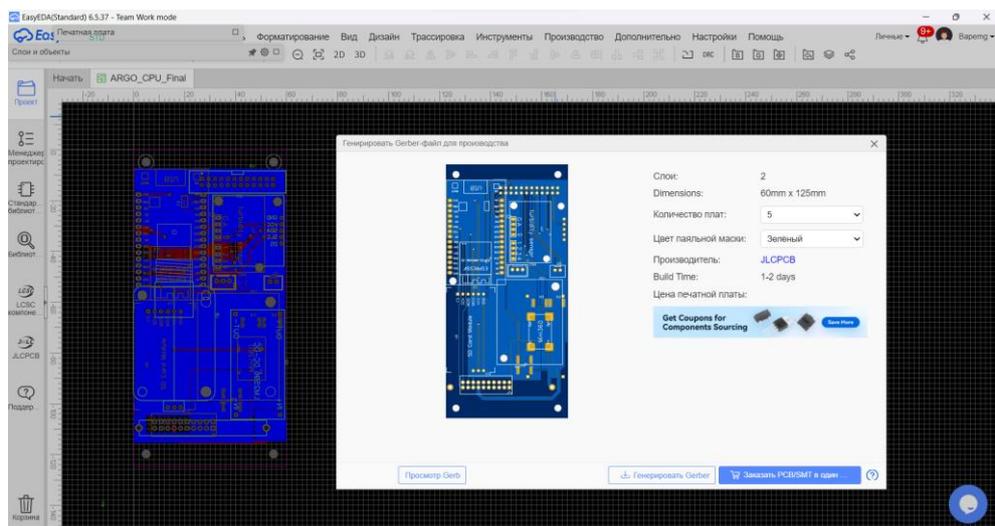


Рисунок 99 — Выгрузка gerber-файлов из EasyEDA

Производство печатных плат для зонда осуществляется в ООО «Резонит». Для монтажа печатных плат достаточно экспортировать из EasyEDA слои контура платы и шелкографии для определения расположения компонентов. Изготовленные печатные платы представлены на рисунке 100.

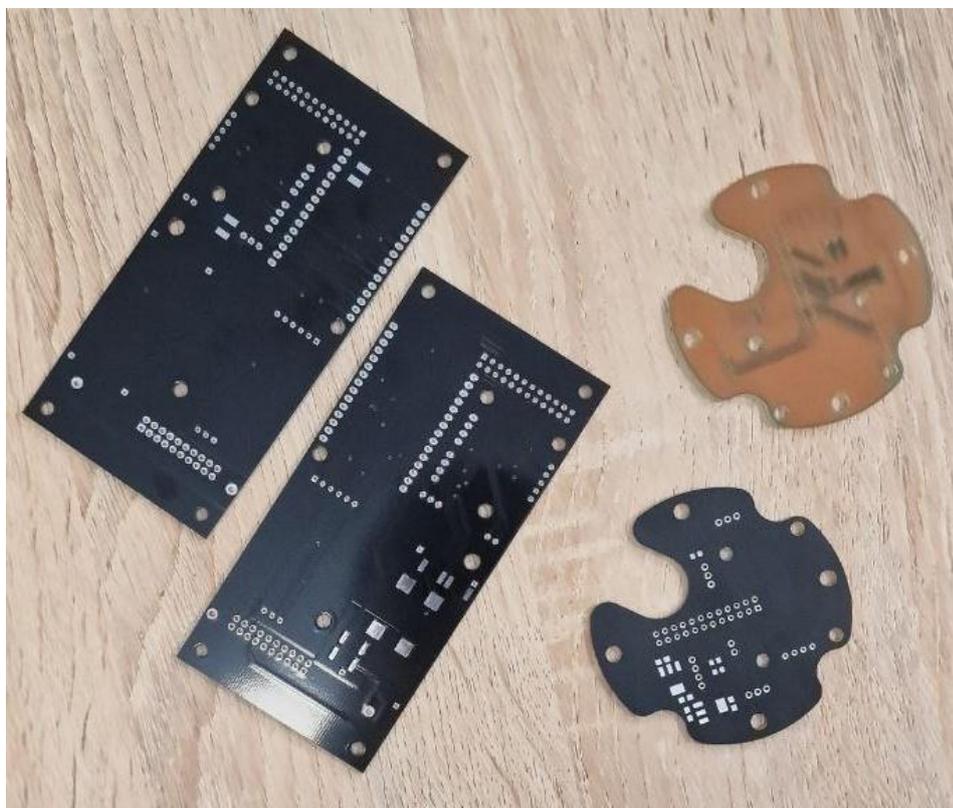


Рисунок 100 — Изготовленные печатные платы

## 4. РАЗРАБОТКА ПРОГРАММНО-АППАРАТНОГО КОМПЛЕКСА

### 4.1 Создание плана программного обеспечения для управления сетью подводных профилирующих зондов

Опираясь на вышепредставленные требования к разрабатываемому изделию, были сформированы следующие задачи для их достижения:

- изучение протокола MQTT;
- создание MESH-сети;
- разработка бизнес-логики системы (составление блок-схемы состояний устройства);
- написание программного кода, используя созданную схему логики системы.

Рассмотрим подробнее каждую из поставленных задач.

#### 4.1.1 Изучение протокола MQTT

MQTT (Message Queue Telemetry Transport) - это легкий, компактный и открытый протокол обмена данными, созданный для передачи информации на удаленных локациях, где требуется небольшой размер кода и его ограничения по пропускной способности канала.

Обмен сообщениями в протоколе MQTT осуществляется между клиентами (client), который может быть издателем или подписчиком (publisher/subscriber) сообщений, и брокером (broker) сообщений.

Данный протокол был выбран, исходя из следующих особенностей:

- компактный и легковесный — минимальные накладные расходы на пересылку данных для экономии трафика;
- устойчивость к потерям — гарантированная доставка в условиях нестабильных сетевых подключений;
- асинхронный протокол — позволяет обслуживать большое количество устройств;
- масштабируемость — дает возможность легкого создания новой сети на основе уже существующей;

- MQTT нейтрален к содержимому пакета — поле данных протокола MQTT может содержать данные любого типа, такие как двоичные файлы, текст ascii и т.д;
- оснащен функцией LWT (“Последняя воля” и “Завещание”) - возможность уведомления пользователя об отключении устройства.

Таким образом, было решено использовать MQTT-сервер для связи пользователя с разрабатываемым изделием, а именно для:

- сообщения параметров миссии (время погружения, дрейфа, всплытия и целевую глубину);
- отправка отладочных печатей об инициализации всех модулей перед началом погружения;
- отправка полученных с датчиков данных с SD-карты устройства на компьютер оператора.

Ниже представлена схема взаимодействия потребителя с устройством (см. рис. 101) и интерфейс приложения MQTT-сервера с указанием значений каждого поля (см. рис. 102).



Рисунок 101 — Схема взаимодействия потребителя с устройством

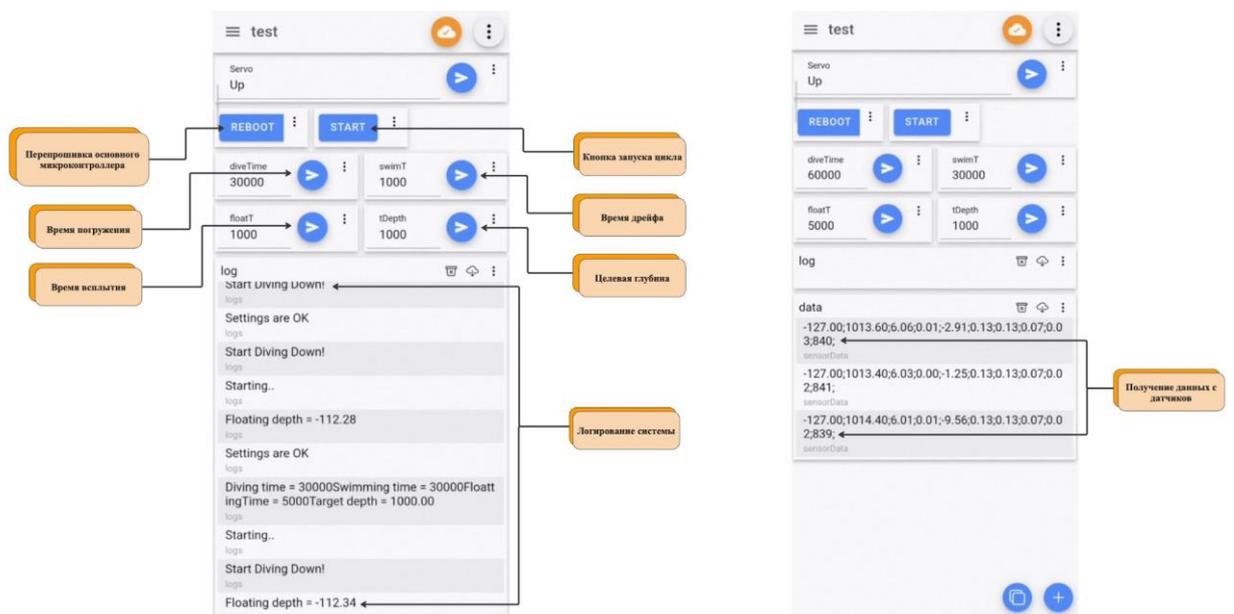


Рисунок 102 — интерфейс MQTT приложения

#### 4.1.2 Создание MESH-сети

MESH-сеть — это распределенная, одноранговая, ячеистая сеть, каждый узел в которой обладает такими же полномочиями как и все остальные (все узлы в сети равны). В данной системе MESH-сеть, основанная на радиосвязи, используется для оптимизации процесса передачи информации с разрабатываемого изделия на компьютер оператора путем прохождения данных через близлежащие устройства сети. На рисунке 103 представлена схема использования MESH-сети, где красной линией показан нерациональный путь отправления показателей, а зеленой - рациональный путь передачи с использованием одноранговой сети.



Рисунок 103 — Схема использования MESH-сети в данной системе

Данная сеть была выбрана, исходя из следующих особенностей:

- независимость — возможность подключения устройств из разных регионов при стихийных бедствиях позволяет иметь сеть на месте происшествия;
- доступность в понимании - понятный и легкий модуль в использовании;
- возможность использования радиосвязь в качестве связи для передачи показателей между устройствами.

Таким образом, было решено использовать MESH-сеть для оптимизации процесса передачи информации, а именно для:

- передача информации путем прохождения данных через близлежащие устройства сети;
- отправка сообщений при отключении устройства от сети.

#### 4.1.3 Разработка бизнес-логики системы

Для написания бизнес-логики устройства были определены основные состояния разрабатываемого устройства:

- Waiting stage (S0) - состояние ожидание параметров миссии, которые будут отправлены пользователем на изделие через MQTT протокол;
- Starting stage (S1) - состояние, при котором происходит инициализация всех модулей и датчиков и налаживание связи;
- Start diving stage (S2) - состояние, при котором происходят следующие процессы:
  - считывание данных с датчиков с некоторой периодичностью с сохранением на флеш-память;
  - сохранение состояний устройства (логирование системы);
  - отключение WiFi и MQTT;
  - отправление команды на погружение (установка СИП в верхнее положение).
- Diving stage (S3) - состояние, при котором происходят следующие процессы:
  - считывание данных с датчиков с некоторой периодичностью с сохранением на флеш-память;
  - сохранение состояний устройства (логирование системы);

- установка СИП в верхнее положение.
- Swimming stage (S4) - состояние, при котором происходят следующие процессы:
  - считывание данных с датчиков с некоторой периодичностью с сохранением на флеш-память;
  - сохранение состояний устройства (логирование системы);
  - установка СИП в состояние нейтральной плавучести.
- Start floating stage (S5) - состояние, при котором происходят следующие процессы:
  - считывание данных с датчиков с некоторой периодичностью с сохранением на флеш-память;
  - сохранение состояний устройства (логирование системы);
  - отправление команды на всплытие (установка СИП в нижнее положение).
- Floating stage (S6) - состояние, при котором происходят следующие процессы:
  - считывание данных с датчиков с некоторой периодичностью с сохранением на флеш-память;
  - сохранение состояний устройства (логирование системы);
  - установка СИП в нижнее положение.
- Data send stage (S7) - состояние, при котором происходит отправка данных с флеш-памяти на оператор компьютера для последующей обработки.

Диаграмма состояний устройства представлена на рисунке 104.

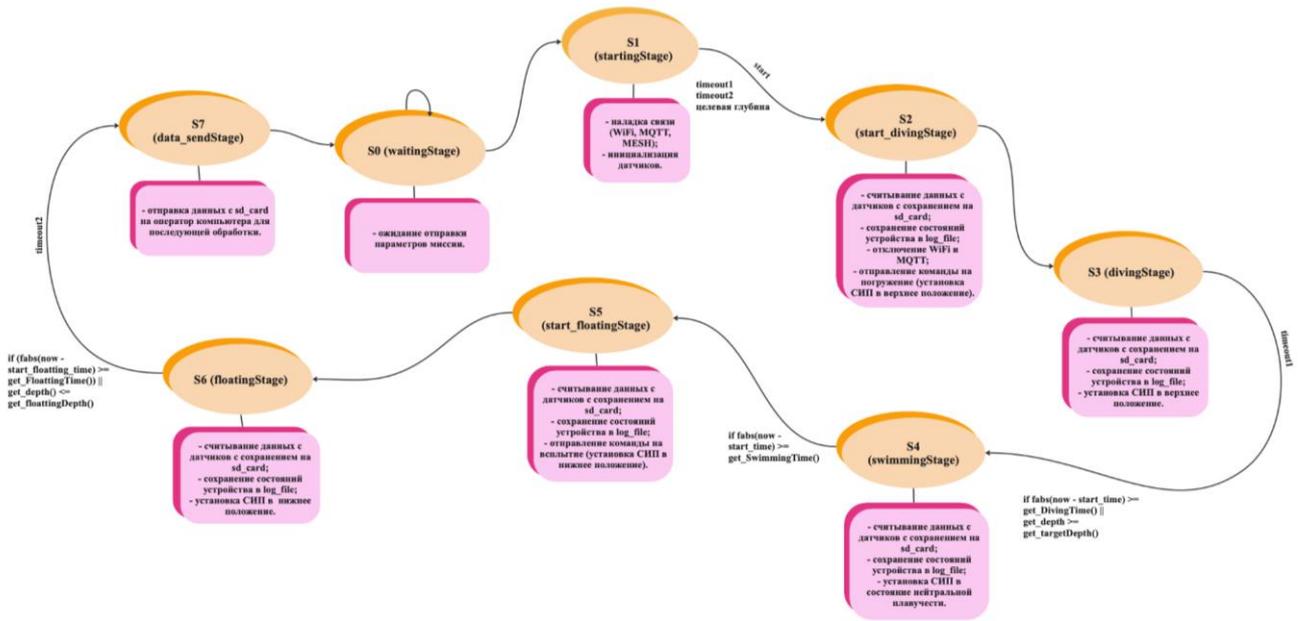


Рисунок 104 — Блок-схема состояний устройства (State Machine)

## 4.2 Парадигмы программирования

Парадигма программирования — это совокупность идей и понятий, определяющих стиль написания компьютерных программ (подход к программированию).

Две основные парадигмы, императивная и декларативная, включают в себя другие. Например, к императивной парадигме относится процедурное и объектно-ориентированное (ООП), а к декларативной — функциональное и логическое. Диаграмма всех подходов программирования представлена ниже на рисунке 105.



Рисунок

Разрабатывая программный комплекс, было принято решение начать с функционального подхода, а потом перейти на ООП, так как функциональная парадигма осваивается и пишется быстрее всего.

#### 4.2.1 Декларативное программирование

Декларативное программирование - парадигма программирования, в которой задается спецификация решения задачи, то есть описывается ожидаемый результат, а не способ его получения. К декларативному программированию относится функциональный метод, предполагающий написание конкретных функций для каждого устройства.

При написании готового кода были выделены следующие файлы (см. рис. 106):

- модуль сопоставления сообщения оператора с функцией устройства;
- модуль усреднения значений данных с датчиков;
- модуль беспроводной локальной сети + MQTT модуль;
- структура сбора данных с датчиков;
- модуль сохранения данных на флеш-память + логирование системы;
- модуль обновления основного микроконтроллера по воздуху;
- модуль системы изменения плавучести СИП.

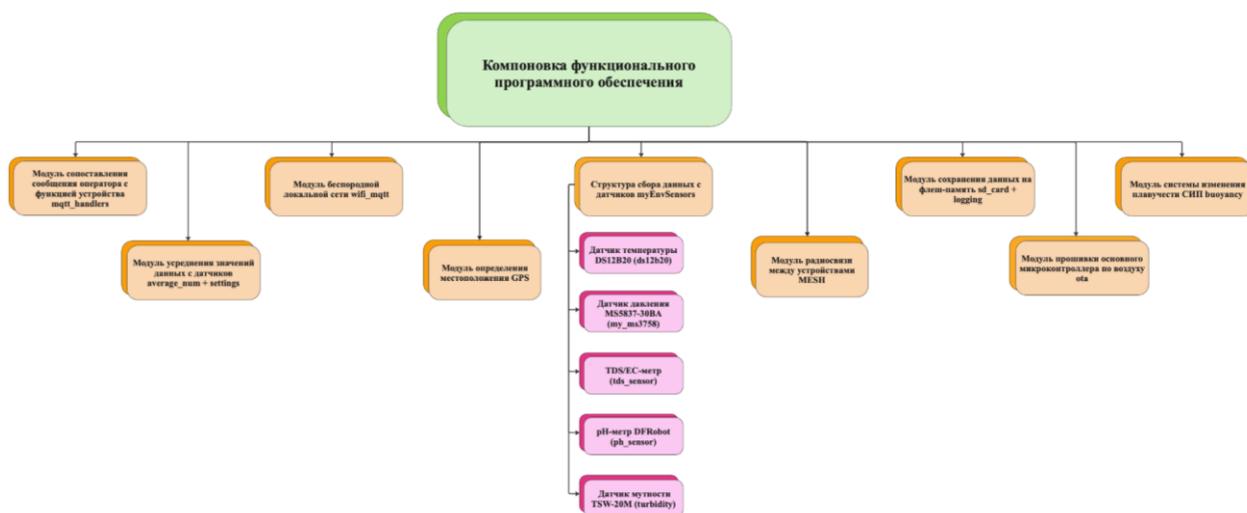


Рисунок 106 — Компоновка функционального программного обеспечения

Рассмотрим основные блоки устройства и их реализацию:

- блок системы изменения плавучести (СИП);

Система изменения плавучести (модуль buoyancy) представляет собой систему из сервопривода постоянного вращения и двух концевых датчиков, ограничивающих верхнее и нижнее положение шприцов. Основными функциями данного модуля является перемещение сервопривода, а следовательно и шприцов для погружения, дрейфа и всплытия. Ниже представлены блок-схемы функций погружения и всплытия (см. рис. 107) и заголовок файла СИП (см. рис. 108).

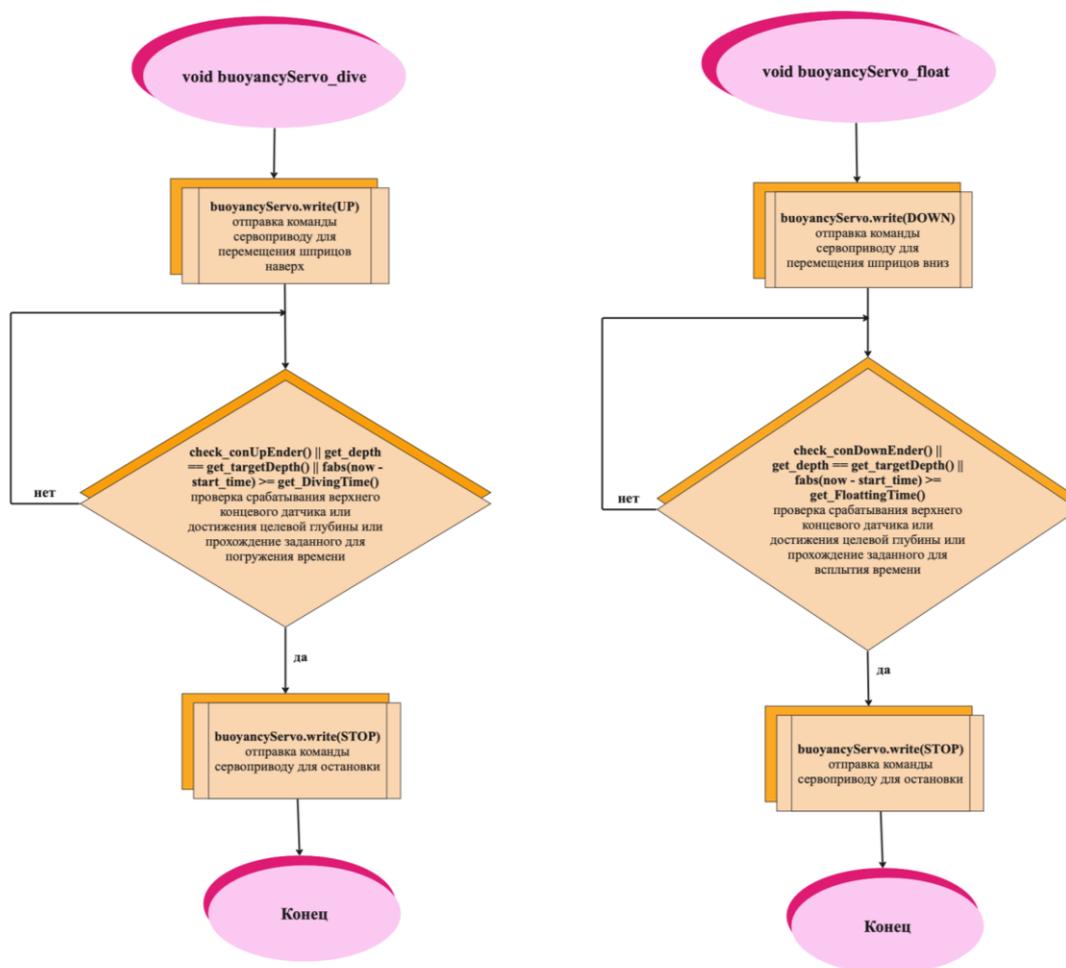


Рисунок 107 — Блок-схема функций погружения и всплытия

```

1  #ifndef __BUOYANCY_H__
2  #define __BUOYANCY_H__
3
4  void buoyancyServo_init(); // инициализация сервопривода
5  void buoyancyServo_dive(); // погружение устройства (движение сервопривода вверх)
6  void buoyancyServo_float(); // всплытие устройства (движение сервопривода вниз)
7  void enders_init(); // инициализация концевых датчиков
8  void buoyancyServo_swim(); // установка сервопривода в положение нулевой плавучести
9
10 bool check_conUpEnder(); // проверка срабатывания верхнего концевого датчика
11 bool check_conDownEnder(); // проверка срабатывания нижнего концевого датчика
12
13 #endif

```

Рисунок 108 — Заголовок файла СИП

- структура сбора данных с датчиков;

Структура `myEnvSensors` представляет собой систему, состоящую из следующих датчиков: датчик температуры, мутности, давления и TDS/EC- и PH-метры и времени, когда были сняты полученные показатели. Основными функциями данной структуры является опрос датчиков (снятие информации с них). Ниже представлены заголовок файла `myEnvSensors` (см. рис. 109) и блок-схема функции опроса датчиков (см. рис. 110).

```
5 ///////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////
6 ///////////////////////////////////////////////////////////////////// COMMON SENSOR FUNCTIONS ///////////////////////////////////////////////////////////////////
7 ///////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////
8
9 #include <Arduino.h>
10
11 typedef struct envSensorData{
12     uint32_t time;
13     float dsTemp,
14         msPressure,
15         msTemperature,
16         msDepth,
17         msAltitude,
18         tdsNormConductivity,
19         tdsEC,
20         tdsTDS,
21         PH,
22         Turbidity;
23 } envSensorData;
24
25 envSensorData get_envData_stamp(); // получение значения структуры
26
27 String get_sensorMsg(); // получение значения датчиков для последующей записи
28
29 void envSensors_init(); // инициализация всех датчиков
30 void envSensorsUpdate(envSensorData &data); // обновление данных, полученных с датчиков
31 void envSensorData_print(envSensorData &data); // печать имеющейся структуры
32 String envSensorData_toString(envSensorData &data); // получение данных структуры для последующей записи
33
34 void print_dataframe_csvData(envSensorData &data); // печать данных структуры для оформления таблицы
35 String dataframe_csvData_toString(envSensorData &data); // получение данных структуры для таблицы
36
37 void print_dataframe_csvHeader(); // печать оглавления таблицы с данными
38 String dataframe_csvHeader_toString(); // получение оглавления таблицы с данными
```

Рисунок 109 — Заголовок файла myEnvSensors

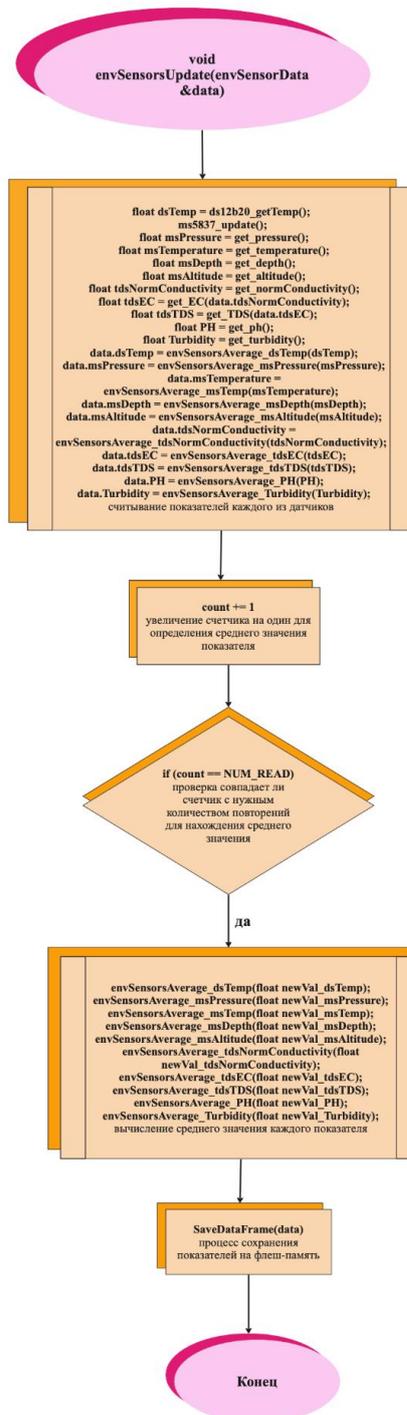


Рисунок 110 — Блок-схема функции опроса датчиков

- модуль сохранения данных на флеш-память.

Модуль SD-card + logging представляет собой систему, состоящую из SD-card и логирования системы. Основными функциями данного модуля является запись собранных с датчиков показателей на флеш-память и запись логов в файл для логирования. Ниже

представлены блок-схемы функций записи данных на SD-card и логирования системы (см. рис. 111) и заголовков файла SD-card и LOG (см. рис. 112).

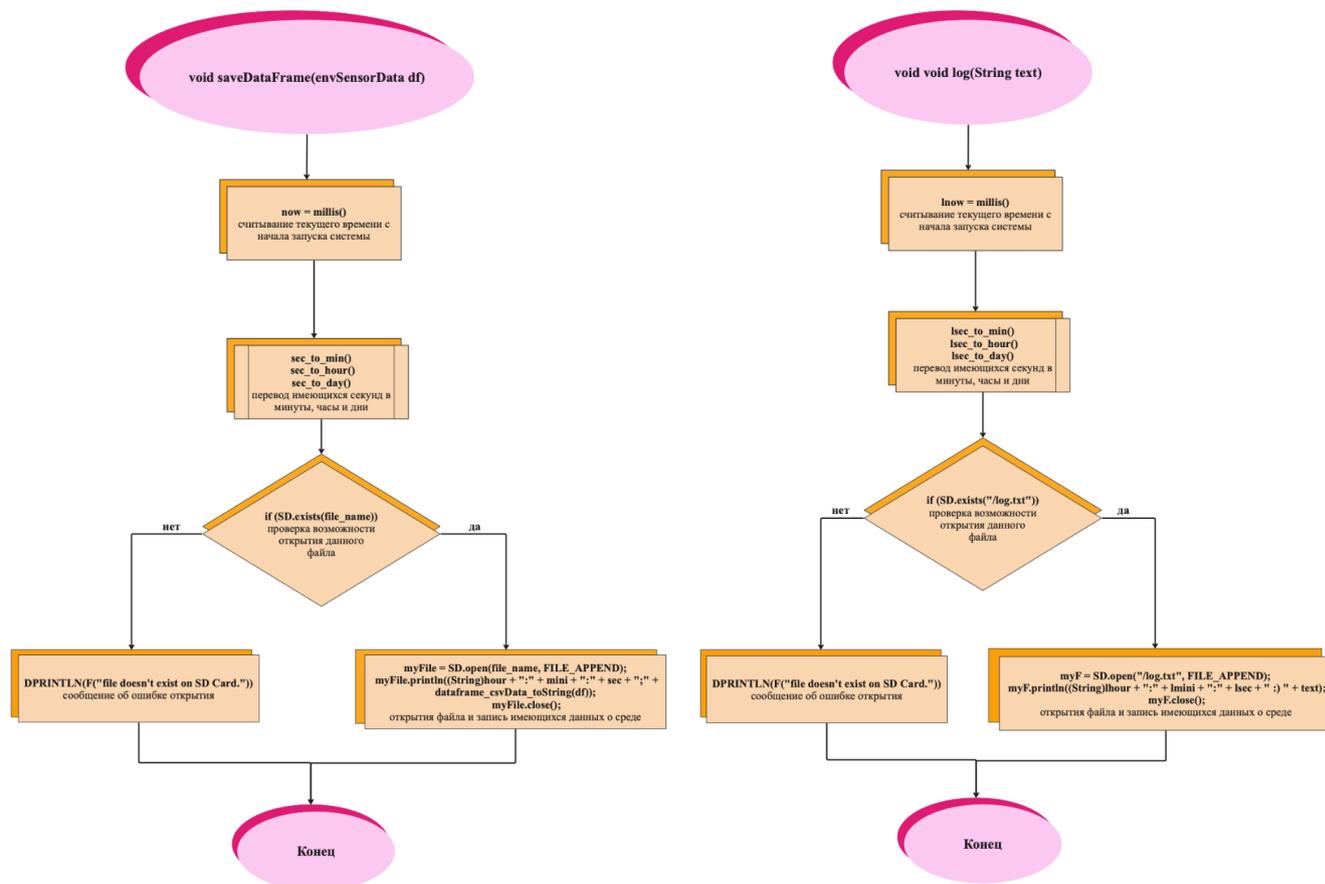


Рисунок 111 — Блок-схемы функций записи данных на SD-card и логирования системы

```

1  #ifndef __SD_CARD_H__
2  #define __SD_CARD_H__
3
4  #include "myEnvSensors.h"
5
6  void sd_card_init(); // инициализация и подключение к SD-card
7  void file_init(); // создание файла на SD-card
8  void saveDataFrame(envSensorData df); // сохранение показателей данных на SD-card
9  void sendDataFrame(); // отправка данных с SD-card на компьютер оператора, используя MQTT
10 void create_file(); // создание названия файла, состоящего из точного времени начала цикла
11
12 #endif
13 #ifndef __LOGGING_H__
14 #define __LOGGING_H__
15
16 #include <Arduino.h>
17
18 void file_log(); // создание файла для записи логов
19 void log(String text); //логирование системы
20 #endif
  
```

Рисунок 112— заголовок файла SD-card и LOG

## 4.2.2 Императивное программирование

Императивное программирование - это парадигма программирования (стиль написания исходного кода), для которой характерно следующее:

- в исходном коде программы записываются инструкции (команды);
- инструкции должны выполняться последовательно;
- данные, получаемые при выполнении предыдущих инструкций, могут читаться из памяти последующими инструкциями;
- данные, полученные при выполнении инструкции, могут записываться в память.

К декларативному программированию относится объектно-ориентированный метод, предполагающий написание классов для каждого устройства.

При написании готового кода были выделены следующие классы (см. рис. 113):

- модуль определения местоположения;
- модуль беспроводной локальной сети;
- структура сбора данных с датчиков;
- модуль сохранения данных на флеш-память;
- модуль констант;
- модуль обновления основного микроконтроллера по воздуху;
- модуль системы изменения плавучести СИП;
- модуль радиосвязи между устройствами MESH.

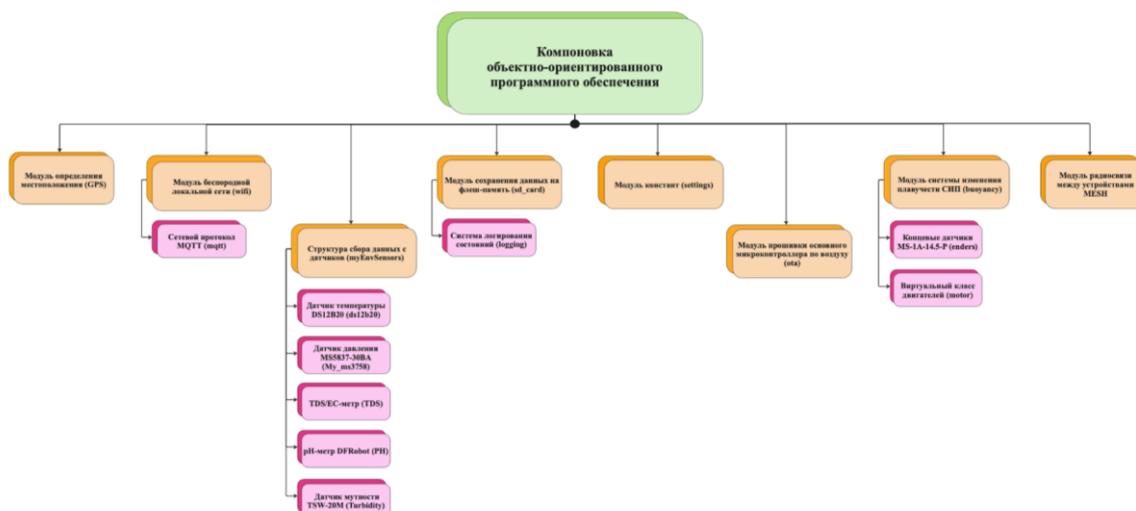


Рисунок 113 — Компоновка объектно-ориентированного программного обеспечения

Рассмотрим некоторые из классов разрабатываемого устройства (см. рисунок 114 - 116).

```
1  #ifndef __WIFI_H__
2  #define __WIFI_H__
3
4  class WIFI
5  {
6      public:
7          WIFI(); // пустой конструктор
8          WIFI(String ssid, String pswd); // конструктор с указанием
9              //названия сети и пароль для подключения
10         WIFI(bool mode); // конструктор с указанием мода (1, если WiFi включен; 0, если WiFi отключен)
11         WIFI(String ssid, String pswd, bool mode); // конструктор с указанием
12             //названия сети, пароль для подключения и мода (1, если WiFi включен; 0, если WiFi отключен)
13         ~WIFI(); // конструктор для удаления класса
14         void setup(); // подключение к сети
15         void stop(); // отключение от сети
16         void set_ssid(String ssid); // установка названия сети
17         void set_pswd(String pswd); // установка пароля для подключения к сети
18         void set_mode(bool mode); // установка мода (1, если WiFi включен; 0, если WiFi отключен)
19         bool get_mode(); // получение мода (1, если WiFi включен; 0, если WiFi отключен)
20         bool check_connection(); // проверка подключения
21     private:
22         String _ssid; // название сети
23         String _pswd; // пароль для подключения к сети
24         bool _mode; // мод (1, если WiFi включен; 0, если WiFi отключен)
25 };
26
27 #endif
```

Рисунок 114 — Заголовок класса модуля беспроводной связи

```
1  #ifndef __DS12B20_H__
2  #define __DS12B20_H__
3
4  class Temperature
5  {
6      public:
7          Temperature(); // пустой конструктор
8          Temperature(byte pin); // конструктор с указанием подключенного пина
9          ~Temperature(); // конструктор для удаления класса
10         void init(); // инициализация датчика температуры
11         void attach(byte pin); // подключение датчика к пину
12         void detach(); // отключение от пина
13         void set_average_number(int average_number); // установка количества повторений
14         bool isInited(); // проверка инициализации
15         bool isAttached(); // проверка подключения
16         float get_temperature(); // считывание показаний с датчика
17         float average(); // нахождение среднего значения температуры
18     private:
19         byte _pin; // пин для подключения
20         bool _attached; // подключение (1, если подключен; 0, если отключен)
21         bool _inited; // инициализация (1, если инициализирован; 0, если не инициализирован)
22         int _average_number; // количество повторений
23         byte counter; // количество исполненных повторений
24 };
25
26 #endif
```

Рисунок 115 — Заголовок класса датчика температуры

```
6 class My_ms5837
7 {
8     public:
9         My_ms5837(); // пустой конструктор
10        My_ms5837(String model); // конструктор с указанием модели
11        My_ms5837(int xfact); // конструктор с указанием калибровочного значения
12        My_ms5837(String model, int xfact); // конструктор с указанием модели и калибровочного значения
13        ~My_ms5837(); // конструктор для удаления класса
14        void init(); // инициализация
15        void init(String model); // инициализация с указанием модели
16        void init(int xfact); // инициализация с указанием калибровочного значения
17        void init(String model, int xfact); // инициализация с указанием модели и калибровочного значения
18        void set_model(String model); // установка модели
19        void set_xFact(int xfact); // установка калибровочного значения
20        void set_average_number(int average_number); // установка количества повторений
21        bool isInitied(); // проверка инициализации
22        void update(); // обновление показаний датчика глубины
23        float get_pressure(); // получение показаний давления
24        float get_temperature(); // получение показаний температуры
25        float get_depth(); // получение показаний глубины
26        float get_altitude(); // получение показаний высоты над уровнем моря
27        float average(); // нахождение средних значений всех данных с датчика давления
28        float average_temp(); // нахождение среднего значения температуры
29        float average_pressure(); // нахождение среднего значения давления
30        float average_depth(); // нахождение среднего значения глубины
31        float average_altitude(); // нахождение среднего значения высоты над уровнем моря
32    private:
33        String _model; // модель
34        int _xfact; // калибровочное значение
35        bool _initied; // инициализация (1, если инициализирован; 0, если не инициализирован)
36        int _average_number; // количество повторений
37        byte counter_pressure; // количество исполненных повторений давления
38        byte counter_temp; // количество исполненных повторений температуры
39        byte counter_depth; // количество исполненных повторений глубины
40        byte counter_altitude; // количество исполненных повторений высоты над уровнем моря
```

Рисунок 116 — Заголовок класса датчика давления

## 5. ПРОВЕДЕНИЕ ИСПЫТАНИЙ

### 5.3 Проведение стендовых испытаний

В ходе работы над проектом был проведен ряд стендовых испытаний. На начальных этапах была успешно протестирована СИП (см. рис. 117).



Рисунок 117 — Тестирование СИП

С целью проверки герметичности и устойчивости устройства были проведены испытания в бассейне (см. рис. 118).



Рисунок 118 — Испытания в бассейне

В соответствии с теоретическими оценками расстояние между центром тяжести и величины устройства невелико. Это повлечет за собой низкую устойчивость изделия при работе

в воде. Этот факт подтвердился результатами стендовых испытаний в бассейне: была выявлена необходимость дополнительно нагрузить зонд. Согласно проведенным тестам при массе свинцовых грузов более 900 г. устройство принимает вертикальное положение устойчивого равновесия. При 2100 г. датчики, расположенные на верхней крышке, полностью погружаются под воду, т.е. прототип обладает около нейтральной плавучестью.

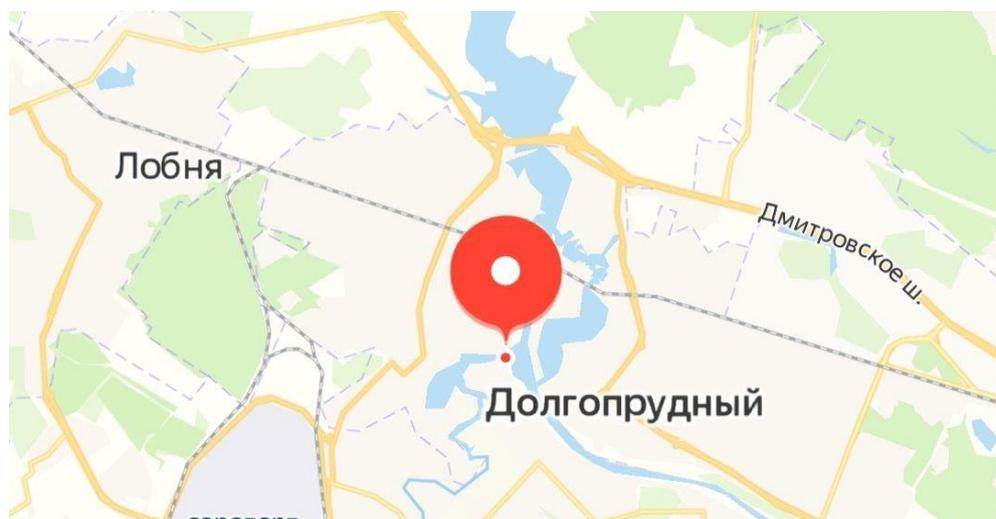
Отсутствие протечек подтвердили герметичность устройства.

#### 5.4 Проведение полигонных испытаний

С целью тестирования программного кода устройства для полного цикла (цикл включает в себя погружение, сбор информации с датчиков, всплытие, передача данных на компьютер оператора) в реальных условиях были проведены натурные испытания на открытой акватории. Для достижения данной цели были поставлены следующие задачи:

- a. подтвердить результаты стендовых испытаний (герметичность прототипа и массу навески);
- b. проверить работоспособность СИП;
- c. протестировать работу MQTT-сервера на воде, проверить стабильность WI-FI соединения;
- d. проверить корректность работы написанного кода в реальных условиях;
- e. собрать данные о среде и распределении гидрофизических параметров, сохранить их в виде таблицы на GOOGLE SHEETS и в формате CSV.

Испытания проводились в притоке реки Клязьма по адресу Набережная, 12, Долгопрудный, Павельцево м-н (см. рис. 119).



### Рисунок 119 — Место проведения испытаний

В состав рабочей группы вошли конструктор, электронщик и программист команды, разрабатывающей устройство, преподавательский состав из четырёх человек, операторы и родители (см. рис. 120).



Рисунок 120 – Участники испытания

Для проведения испытаний было использовано следующее оборудование: разработанный прототип, три надувные ПВХ лодки (с возможностью якорения) (см. рис. 121-122), спасательные жилеты, инструменты для работы с устройством (см. рис. 123), набор свинцовых грузов.



Рисунок 121 — Подготовка надувных лодок для проведения испытаний



Рисунок 122 — Проведение испытаний на лодках



Рисунок 123 — Оборудование для испытаний

В ходе подготовки к испытаниям был составлен план в соответствии с поставленными задачами (см. рис. 124). В рамках первого этапа проведения испытаний было необходимо промерить глубину водоема в месте, выбранном для запуска устройства, и соотнести полученные данные с габаритами зонда, в случае необходимости выбрать более подходящую локацию; подтвердить результаты стендовых испытаний. В рамках второго этапа были поставлены следующие задачи:

- проверить и отладить работу MQTT-сервера;
- проверить работоспособность системы изменения плавучести;
- проверить работу датчиков, получить с них записанные данные;

По результатам этого этапа устройство должно отработать 20 циклов — количество циклов, на которое рассчитана аккумуляторная батарея.

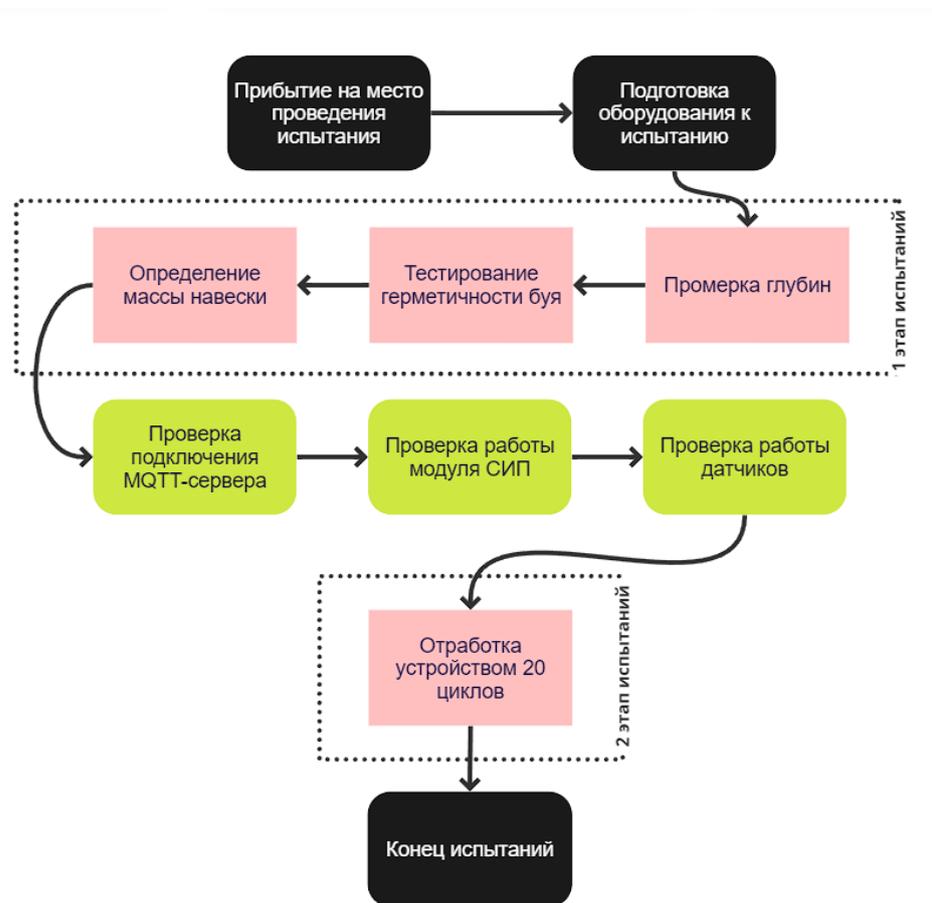


Рисунок 124 — Roadmap испытания

Карта местности с отмеченными местами проведения запусков представлена на рисунке 125. Также на рисунке 126 приведена батиметрическая карта местности в соответствии с атласом единой глубоководной системы европейской части Российской Федерации.



Рисунок 125— Места запуска устройства



Рисунок 126 — Карта глубин на месте проведения испытаний

Прототип был доставлен на место испытания в разобранном виде, чтобы предотвратить его поломку из-за резких перепадов температур, поэтому перед первым этапом испытаний необходимо было герметично собрать зонд (см. рис. 127).



Рисунок 127 — Сборка устройства

Первый запуск устройства (см. рис. 128) был произведен в месте, отмеченном на карте под номером 1.



Рисунок 128 — Первый спуск устройства на воду

В соответствии с составленным планом в начале была промерена глубина реки с использованием ручного лота (груз и веревка с метровыми метками). Результаты измерений представлены в таблице 7.

Таблица 7 — Измерение глубины реки

Номер замера	Значение глубины, м
1	4.9
2	4.6
3	4.2
4	4.3

5	4.7
<b>Среднее значение</b>	4.54

Среднее значение глубины в месте проведения испытаний по результатам измерений (4.54 м) превышает теоретическую оценку, представленную на рисунке 86 (4.4 м) на 3%. Расхождение теоретических и полученных значений, обусловлено погрешностью измерения. При сравнении продольного габарита устройства, численно равного 0.8 м, с глубиной в месте проведения испытаний, которая в 5.6 раз превышает размеры прототипа, был сделан вывод, что данный участок водоема подходит для проведения испытаний.

Результаты стендовых испытаний были подтверждены: при массе навески 2100 г. устройство обладает около нейтральной плавучестью. Масса забортной воды при верхнем положении поршней в СИП – 200 г. Соответственно для корректной работы устройства необходимы дополнительные свинцовые грузы массой более 1900 г.

Выводы по результатам первого испытания:

- среднее значение глубины в месте запуска устройства — 4.5 м;
- при массе грузов 2100 г. устройство обладает нейтральной плавучестью;
- определена масса грузов для отработки устройством полного цикла — более 1900 г.

В ходе подготовки ко второму этапу испытаний потребовалось частично разобрать устройство, чтобы загрузить на микроконтроллер код для полного цикла (см. рис. 129-130). В процессе работы было установлено, что датчик давления работал некорректно, таким образом, было принято решение регулировать время полного цикла прототипа перед началом его работы при помощи MQTT-сервера, а движение поршней в балластной системе ограничивать концевыми датчиками. Также были проведены проверки подключения прототипа к MQTT-серверу и сбора данных с последующем отправлением информации в таблицу.



Рисунок 129 — Прототип в разобранном состоянии



Рисунок 130 — Проверка программного кода

Второй запуск был проведен в месте, отмеченном на карте под номером 2.

Сигнал о запуске цикла передавался устройству через MQTT-сервер с телефона (см. рис. 131-132). Каждый цикл занимал 2 минуты (время, которое было задано оператором). Система изменения плавучести, которая отвечает за погружение и всплытие зонда, отработала циклы в штатном режиме. Следует отметить, что при всплытии устройство еще некоторое время

совершает затухающие колебания вдоль вертикальной оси, во время которых WiFi-соединение его с компьютером нестабильно из-за периодического погружения зонда под воду, поэтому подключение MQTT-сервера для передачи данных по подсчетам происходит через 30 секунд с момента первого выхода изделия на поверхность.



Рисунок 131 — Проверка работы MQTT-сервера

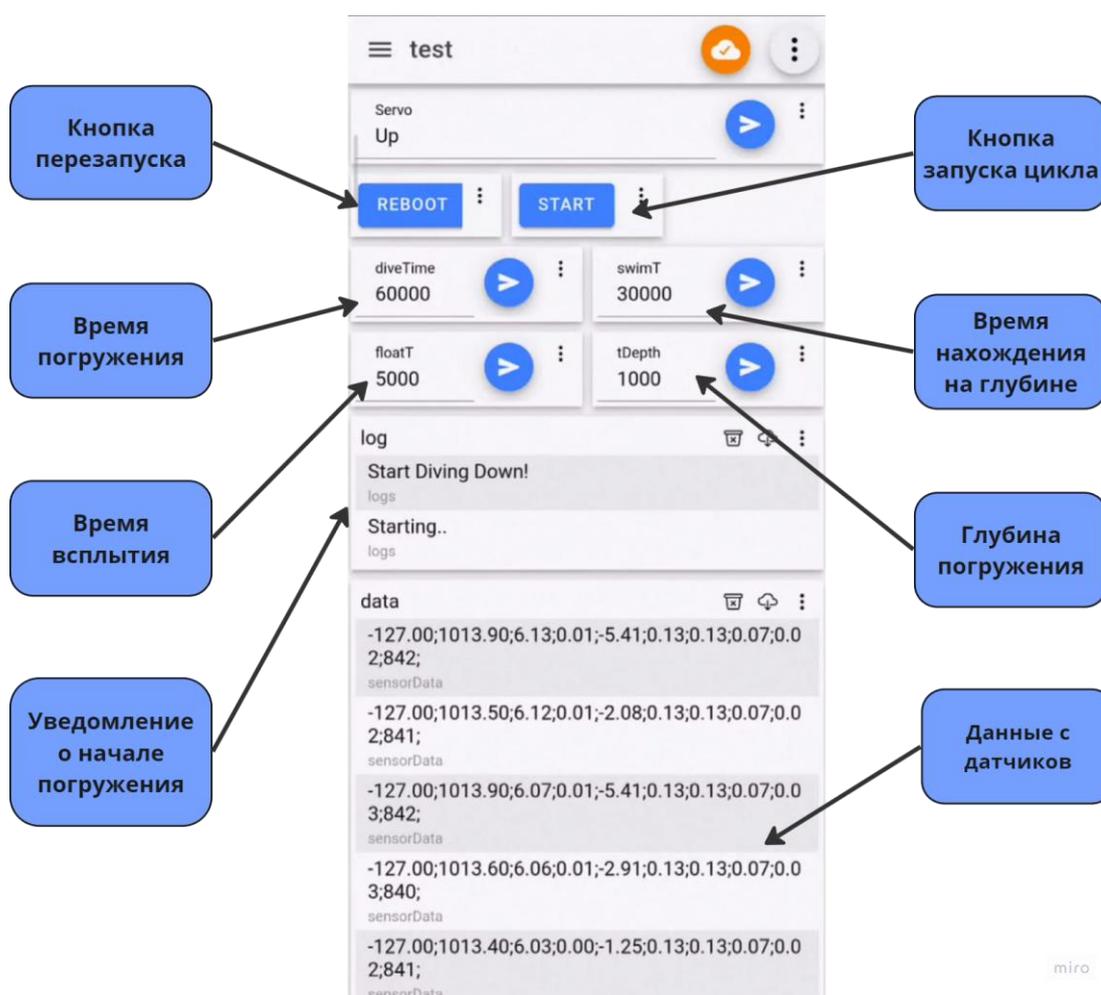


Рисунок 132 — Управление устройством через MQTT-сервер

В ходе испытаний данные о гидрофизических свойствах среды были сняты только с комплексного датчика давления и температуры. Другие датчики (температуры, мутности, кислотности, проводимости) в рамках испытания не были подключены.

После отработки устройством 4 циклов было принято решение продолжить испытания в месте, отмеченном на карте под номером 3, так как во второй локации прототип слишком сильно сносило течением, что осложняло наблюдения за его работой. На новом месте была поставлена задача проверки работоспособности системы на маленьких интервалах: время, отведенное на полный цикл, было уменьшено до 1 минуты. После каждого всплытия устройство отправляло пакет данных через сервер на компьютер оператора, который перенаправлял их в GOOGLE SHEETS. В рамках испытаний на третьей локации зонд успешно отработал 12 циклов. Этапы цикла представлены на рисунках 133-136.



Рисунок 133 — Спуск устройства на воду



Рисунок 134 — Погружение устройства



Рисунок 135 — Всплытие устройства



Рисунок 136 — Прототип отправляет данные на сервер

Текущего на момент начала испытаний уровня заряда аккумулятора хватило для проведения 12 тестов, тогда как согласно расчетам зонд должен был отработать 20 циклов. Идеальная температура для работы литий-ионных батарей составляет около  $+20\text{ }^{\circ}\text{C}$ , с возможным отклонением на 5–10 градусов в любую сторону. Температура воды в день проведения испытаний составляла  $+5\text{--}6\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Большинство из литий-ионных батарей при низких показателях температуры теряют емкость, также у них наблюдаются просадки напряжения, ухудшение токоотдачи, быстрая разрядка, что подтверждается результатами проведенных натуральных испытаний. Таким образом, можно сделать вывод о необходимости учитывать сильное влияние внешних факторов на аккумулятор. Следует отметить, что концепт модульности устройства позволяет увеличить продолжительность работы устройства посредством добавления в сборку нескольких модулей АКБ, что и будет использовано при создании следующих прототипов для устранения описанной ранее проблемы. По результатам испытаний также выявилась необходимость в системе контроля заряда аккумуляторной батареи: прототип успел закончить 12 цикл (устройство успешно всплыло и передало собранный пакет данных оператору), однако

оставшегося заряда АКБ не хватило, чтобы начать новый. В следующих прототипах, с целью избежать разрядки аккумулятора на глубине, будет предусмотрена система экстренного всплытия устройства.

Выводы по результатам второго испытания:

- СИП работает корректно;
- MQTT-сервер работает корректно;
- устройство успешно отправляет данные с датчиков в GOOGLE SHEETS;
- необходимо разработать систему контроля заряда аккумуляторной батареи и систему экстренного всплытия.

При анализе результатов, полученных с датчиков, были выявлены следующие проблемы: в ходе испытаний информация о гидрофизических свойствах среды была снята с комплексного датчика давления и температуры, у которого канал температуры работал корректно (показания согласуются с реальными), а канал определения давления некорректно, предположительно по механической причине. Также на данный момент не была проведена калибровка датчиков, поэтому данные еще требуют дополнительной обработки. Следует заметить, что сбой в работе датчика никак не сказался на выполнении устройством цикла, так как его параметры задавались оператором вручную. Данные о температуре и давлении, собранные с прототипа представлены на рисунке 137.

Сбор данных с буя

File Edit View Insert Format Data

100%

J11

	A	B	C
1	Pressure	Temperature	
2	1013.60	06.06	
3	1013.90	06.07	
4	1013.60	06.09	
5	1013.50	6.12	
6	1013.90	6.13	
7	1015.20	7.00	
8	1015.20	07.01	
9	1015.60	7.00	
10	1015.10	6.99	
11	1015.00	6.98	
12	1014.90	6.96	
13	1014.80	6.95	
14	1015.10	6.95	
15	1015.50	6.94	
16	1015.30	6.94	
17	1014.90	6.93	
18	1015.20	6.92	

Листик

Рисунок 137— Данные, собранные с прототипа

По результатам проведенных испытаний были успешно выполнены следующие задачи:

- успешная герметизация устройства;
- определение необходимой массы навески в соответствии с поставленными задачами;
- проверка работы MQTT-сервера;
- успешная отправка данных с датчиков в GOOGLE SHEETS;
- проверка корректности работы СИП.

Также были выявлены следующие проблемы:

- проблемы с работой датчика давления (i2c);
- нехватка заряда АКБ для продолжительной работы, сильное влияние внешних факторов. Выявлена необходимость разработать систему контроля заряда

аккумуляторной батареи и систему экстренного всплытия.

Подводя итоги, были проведены натурные испытания для тестирования конструкции и программного кода разрабатываемого устройства, в результате которых были выявлены сильные и слабые стороны первого прототипа. Основываясь на полученном опыте, будут определены пути дальнейшего развития проекта. Так при разработке второго прототипа, наравне с общей модернизацией устройства, особое внимание будет уделено проблемам, которые возникли при первом запуске зонда.

Вторые натурные испытания прошли в бассейне на базе учебно-методического отдела ГКУ ДПО «УМЦ ГО и ЧС» (см. рис. 138).



Рисунок 138 — Испытания в МЧС

В ходе отработки цикла устройство снимало показатели с датчиков, представленные на рисунке 139. На момент проведения данных испытаний измерительные приборы также не были откалиброваны.

Time	Temp	Pressure	Temperature	Depth	Altitude	S
13:20:19	26.81	1003.05	26.22	-0.10	85.22	0.08
13:20:31	26.89	1002.53	26.23	-0.11	89.63	0.08
13:20:50	27.56	1002.90	26.24	-0.10	86.48	0.08
13:21:15	27.30	1002.65	26.26	-0.11	88.58	0.08
13:21:46	27.45	1002.28	26.31	-0.11	91.72	0.08
13:22:23	27.64	1002.25	26.31	-0.11	91.94	0.08
13:23:07	27.95	1002.25	26.48	-0.11	91.93	0.08
13:23:57	28.44	1001.97	26.88	-0.11	94.24	0.08
13:24:53	28.61	1002.15	27.24	-0.11	92.77	0.08
13:26:56	28.55	1002.15	27.24	-0.11	92.77	0.08
13:29:05	28.41	1002.10	27.17	-0.11	93.19	0.08
13:31:20	28.33	1001.77	27.15	-0.11	95.92	0.08
13:33:42	28.22	1001.53	27.56	-0.12	98.02	0.08
13:36:10	28.16	1001.88	26.50	-0.11	95.08	0.08
13:38:44	28.53	1001.75	26.96	-0.12	96.13	0.08
13:43:16	28.54	1001.63	26.99	-0.12	97.18	0.08

Рисунок 139 — Данные с датчиков

Результатом проведения испытаний стало предоставление учебно-методическим отделом рецензии на разработанное устройство устройство (см. рис. 140).

#### РЕЦЕНЗИЯ

на работу Нагорской Т. С., Еремихиной М.Г., Быкова А.П.  
под научным руководством Смирнова И.А., Ткаченко А.А.,  
Худайдаевой Р.Р.

**«Исследование и разработка автономного гидрофизического зонда как перспективного средства оперативной океанологии»**

Характер, сложность и номенклатура работ, выполняемых под водой с каждым годом расширяется. В ходе проведения мероприятий по своевременной оценке состояния обширных водных акваторий, а также оперативному отслеживанию и контролю основных гидрофизических параметров в настоящее время есть острая необходимость в разработке погружных автономных систем, способных без участия человека производить замеры ключевых параметров в широком диапазоне глубин и различных гидрологических условиях, оперативно передавать данные в пункты сбора, хранения и обработки информации.

Эти обстоятельства подчеркивают актуальность разработки автономного гидрофизического зонда, способного дистанционно выполнять мониторинг водных пространств.

Представленный авторами материал обладает определенной научной новизной, которая проявляется как в программно-аппаратной, так и в технологической реализации изделия.

Теоретическая значимость заключается в полном и всестороннем методическом изложении материала проектирования и создания автономного гидрофизического зонда, способного измерять ряд гидрофизических параметров окружающей среды в режиме профилирования. Приведены методы проектирования программно-аппаратного комплекса, общей

компоновочной схемы изделия, проведено математическое моделирование гидродинамических и прочностных параметров разрабатываемого изделия.

Практическая значимость проявляется в возможности использования основных результатов и выводов работы в качестве основы для разработки и совершенствования методов проектирования систем оперативной океанологии.

Анализ представленной на рецензию работы «Исследование и разработка автономного гидрофизического зонда как перспективного средства оперативной океанологии» показал, что авторами проведена актуальная работа, отвечающая основным требованиям научного исследования.

РЕЦЕНЗЕНТ:

Начальник учебно-методического отдела  
ГКУ ДПО «УМЦГО и ЧС»

А.С. Коршунков

«26» декабря 2013 г.



Рисунок 140 — Рецензия

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе работы над проектом были выполнены следующие задачи:

- проведен анализ современного уровня развития отечественных и зарубежных систем оперативной океанологии;
- на основе технического задания разработан концепт устройства;
- проведено моделирование прочностных и гидродинамических параметров изделия;
- разработан и собран прототип аппарата;
- проведены полунатурные и натурные испытания.

Материалы по проекту представлены в Приложении Б.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Миссия Argo // Международная программа по собору океанологических данных Argo. URL: <https://argo.ucsd.edu/> (дата обращения: 12.05.2023).
2. SMAP (Soil Moisture Active Passive) Maps: RSS (Really Simple Syndication) Salinity // NASA Salinity. URL: <https://salinity.oceansciences.org/smap-salinity.htm> (дата обращения: 03.01.2024).
3. Коротаев Г.К. Оперативная океанография – новая ветвь современной океанологической науки / Г.К. Коротаев // Вестник российской академии наук. – Севастополь: МГИ РАН. – 2018. – Т. 88. – №7. – С. 579-588. DOI: 10.31857/S086958730000081-7
4. Коваленко В.В. Методические основы построения систем оперативной океанографии в приложении к задачам подводного наблюдения / В.В. Коваленко, А.А. Родионов, Р.Е. Ванкевич // Фундаментальная и прикладная гидрофизика. – 2021. – Т. 14, № 3. – С. 4-19. DOI: 10.7868/S2073667321030011
5. Ерёмина Т.Р. Оперативная океанография: учеб. пособие. / Т.Р. Ерёмина, Е.В. Софьина, И. Дайлидиене, под ред. Л.Н. Карлина. – СПб., изд. РГГМУ. – 2014. – 99 с.
6. Донные геофизические обсерватории: методы конструирования и области применения/ П. Башилов [и др.]. – Научное приборостроение. – 2008. – С. 86-91.
7. Duennebie F. K. et al. HUGO: The Hawaii undersea geo-observatory //IEEE journal of oceanic engineering. – 2002. – Т. 27. – №. 2. – С. 218-227.
8. Hirata K. et al. Real-time geophysical measurements on the deep seafloor using submarine cable in the southern Kurile subduction zone //IEEE Journal of Oceanic Engineering. – 2002. – Т. 27. – № 2. – С. 170-181.
9. Morimoto A., Yanagi T., Kaneko A. Tidal correction of altimetric data in the Japan Sea //Journal of oceanography. – 2000. – Т. 56. – №. 1. – С. 31-41.
10. Marinaro G. et al. A cabled monitoring module for gas seepage: the first experiment in a pockmark (Patras Gulf, Greece) //2007 Symposium on Underwater Technology and Workshop on Scientific Use of Submarine Cables and Related Technologies. – IEEE, 2007. – С. 343-348.
11. Gallager S. M. et al. Design, installation, and operation of the PLUTO observatory, Isla de Canales de Tierra, Panama //OCEANS 2008. – IEEE, 2008. – С. 1-10.
12. Использование морской робототехники в задачах оперативной океанографии: отечественный и зарубежный опыт / В.Ю. Занин, А.М. Маевский, И.В. Кожемякин // Морские информационно-управляющие системы. – СПб. – 2020. – №1 (17). – С. 94-102.

13. GLIDERS // Coriolis : In situ data for operational oceanography.  
URL:<https://www.coriolis.eu.org/Observing-the-Ocean/GLIDERS> (дата обращения: 16.05.2023)
14. Observing system monitoring center // PMEL Dash Portal.  
URL:[https://viz.pmel.noaa.gov/osmc/?color\\_by=platform\\_type](https://viz.pmel.noaa.gov/osmc/?color_by=platform_type) (дата обращения: 15.06.2023)
15. Fugro metocean measurements // Fugro. URL:  
<https://www.fugro.com/expertise/metocean#benefits> (дата обращения 23.12.2023)
16. Zaeri N. Marine environment monitoring system for Kuwaiti water territories //2006 IEEE GCC Conference (GCC). – IEEE, 2006. – С. 1-5.
17. Physical Oceanography Division. Global Drifter Program // NOAA's Atlantic Oceanographic & Meteorological Laboratory. URL:<https://www.aoml.noaa.gov/phod/gdp/index.php> (дата обращения 18.12.2023)
18. Комплекс CRAB // ООО «Морской Технический Центр».  
URL:[https://mtcgeo.com/crab\\_system-2/](https://mtcgeo.com/crab_system-2/) (дата обращения 10.10.2023)
19. Подводные глайдеры НПП ПТ Океанос // Морская робототехника НПП ПТ Океанос. Подводные аппараты. URL:[https://oceanos.ru/Gliders\\_general](https://oceanos.ru/Gliders_general) (дата обращения 24.07.2023)
20. Ашик И.М. Состояние и перспективы развития системы мониторинга гидрологических условий акватории Северного Ледовитого океана/ И.М. Ашик [и др.] // Проблемы Арктики и Антарктики. – 2022. – Т. 68. – № 1. – С. 8-25.
21. Использование дрейфующих буев и буксируемого профилографа для исследования течений на шельфе черного моря / С.А. Мысленков [и др.] // Вестн. моск. ун-та. Сер. 5. География. – 2014. – №6. – С. 73-80.
22. Мысленков С.А. Исследование течений на шельфе Черного моря с помощью ГНСС-мониторинга/ С.А. Мысленков, Т.Е. Самсонов // Изв. вузов. Геодезия и аэрофотосъемка. – 2014. – № 3. – С. 60-68.
23. Мотыжев С.В. Создание дрейфтерной технологии для контроля океана и атмосферы / С.В. Мотыжев // Морской гидрофизический журнал. – Севастополь: МГИ РАН. – 2016. – № 6. – С. 74-88.
24. Ball G., Motyzhev S., Lunev E., Tolstosheev A. Observing the Southern Ocean and beyond with an extremely long-lived drifting buoy // Argos Forum. – 2015. – № 80. – С. 6-7.
25. Poulain P.M., Barbanti R., Motyzhev S., Zatsepin A. Statistical description of the Black Sea near-surface circulation using drifters in 1999 – 2003 // Deep-Sea Res. Part I. – 2005. – 52, Iss. 12. – P. 2250-2274.

26. Толстошеев А.П. Развитие средств и методов дрейфтерной технологии применительно к проблеме изучения Черного моря / А.П. Толстошеев, Е.Г. Лунев, С.В. Мотыжев // Океанология. – 2008. – 48, № 1. – С. 149-158.
27. Дрейфтерный мониторинг Каспийского моря / В.А. Иванов [и др.] // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа. – Севастополь: МГИ НАН. – 2011. – Вып. 24. – С. 288-298.
28. Заякоренная роботизированная профилирующая океанская обсерватория для целей мониторинга критических акваторий, охраны морской среды и научных исследований/ Островский А. Г. [и др.] // Технические проблемы освоения Мирового океана. – 2009. – Т. 3. – С. 57-64.
29. Позиционная автономная гидрофизическая измерительная станция (ПАГИС) // Специальное конструкторское бюро средств автоматизации морских исследований Дальневосточного отделения Российской академии наук. URL: <https://skbsami.ru/const/2021/04/27/pagis.html> (дата обращения 20.12.2023)
30. Патин С.А. Нефть и экология континентального шельфа / С.А. Патин – М. – 2017. – 326 с.
31. Воробьев В.Л., Акимов В.А., Соколов Ю.И.. Предупреждение и ликвидация аварийных разливов нефти и нефтепродуктов / В.Л. Воробьев, В.А. Акимов, Ю.И. Соколов. – М. : Ин-октаво, 2005. – 368 с.
32. Шельфовые проекты // РОСНЕФТЬ. URL:<https://www.rosneft.ru/business/Upstream/offshore/> (дата обращения 20.09.2023)
33. BELKIN I.M. Remote Sensing of Ocean Fronts in Marine Ecology and Fisheries // Remote Sensing. – 2021. – Vol. 13. – 883. – P. 34.
34. CHASSOT E., BONHOMMEAU S., REYGONDEAU G., NIETO K. et al. Satellite remote sensing for an ecosystem approach to fisheries management // ICES Journal of Marine Science. – 2011. – Vol. 68, No.4. – P. 651-666.
35. Яржомбек А.А. Образ жизни и поведение промысловых рыб / А.А. Яржомбек. – М. : ВНИРО, 2016. – 200 с.
36. Алексанин А.И. О мониторинге морских рыбопромысловых районов с использованием спутниковых данных и информации от морских робототехнических комплексов/ А.И. Алексанин, А.Ф. Щербатюк // Управление большими системами. – Вып. 100. – 2022. – С. 236-260. DOI: 10.25728/ubs.2022.100.11
37. Научно-исследовательские учреждения // Федеральная служба по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды. URL: <https://www.meteorf.gov.ru/about/structure/niu/> (дата обращения: 03.11.2023).

38. Егоров В.И. Подводные буксируемые системы / В.И. Егоров. – Л.: Судостроение, 1981. – 304 с.
39. Труды ЦАГИ им. Н.Е. Жуковского, выпуск 1413. Аэродинамические характеристики острых и притупленных конусов при дозвуковых и сверхзвуковых скоростях / В.Г. Артонкин, П.Г. Леутин, К.П. Петров и др. – Москва: Изд. ЦАГИ, 1972. – 93 с.
40. Самоходные обитаемые подводные аппараты / Под общ. Ред. И.Б. Иконникова, Л.: Судостроение, 1986. – 264 с.

## ПРИЛОЖЕНИЕ А

### Расчет себестоимости устройства

Название компонента	Количество, шт	Цена, руб.
<b>Система изменения плавучести (СИП)</b>		
Направляющие валы	4	600
Трапецеидальный винт и гайка	1	370
Шприцы медицинские	4	30
Диск для сервопривода 25T	1	50
Механические концевые датчики	2	140
Линейные подшипники	4	410
Сервопривод	1	480
<b>АКБ</b>		
Стойки	3	295
Термоусадка (диаметр окружности – 80мм)	1	250
BMS-плата	1	68

Литий-ионные аккумуляторы 18650	12	250
Комплект разъемов XT30 (мама-папа)	2	150
<b>Система управления</b>		
ESP-32 Wroom 30 PINS	1	300
Преобразователи напряжения LM2596	2	60
Резисторы 4.7 кОм	3	4
Стабилизаторы напряжения 3.3В AMS1117	2	350
<b>Система датчиков</b>		
Датчик PH	1	3800
Датчик мутности	1	1600
Датчик температуры	1	330

Датчик давления	1	4100
TDS/ЕС-метр	1	1500
<b>Стыковка отсеков</b>		
Труба акриловая	1	1800
Кольца резиновые уплотнительные 078-084-36	4	130
<b>Винты, гайки и втулки</b>		
Винты М3	100	10
Гайки М3	14	15
Втулки вплавляемые М3	54	10
<b>ИТОГО:</b>		26375

## **ПРИЛОЖЕНИЕ Б**

### **Материалы проекта**

Для ознакомления с фото- и видеоматериалами, программным кодом, 3D-моделями устройства и электрическими схемами можно перейти на [Google disk](#).