

Раздел II. Морская робототехника

УДК 551.46.077:529.584

**В.Ю. Занин, И.В. Кожемякин, Ю.П. Потехин, И.А. Путинцев, В.А. Рыжов,
Н.Н. Семенов, М.Н. Чемоданов**

РАЗРАБОТКА АВТОНОМНЫХ НЕОБИТАЕМЫХ ПОДВОДНЫХ АППАРАТОВ КЛАССА МИКРО С ФУНКЦИЕЙ ГРУППОВОГО УПРАВЛЕНИЯ

Приведены результаты работ, выполненных Санкт-Петербургским государственным морским техническим университетом, в рамках инициативной тематики, связанной с комплексными исследованиями в обеспечение создания мультиагентной сенсорно-коммуникационной сети на основе морских роботизированных платформ (МРП). К МРП отнесены следующие автономные обитаемые транспортные/измерительные/коммуникационные/обеспечивающие платформы: подводные глайдеры, буи и зонды переменной плавучести, волновые глайдеры, донные и ледовые коммуникационные станции, док-станции мобильных подводных обитаемых объектов, автономные обитаемые подводные аппараты, беспилотные надводные суда. Перечисленные МРП в совокупности образуют комплекс робототехнических средств – эффективных элементов морской мультиагентной сенсорно-коммуникационной сети. В контексте указанных работ рассматривается создание автономного обитаемого подводного аппарата класса микро (АНПА-М), к которому предъявляются требования высокой маневренности, наличия модульной архитектуры и поддержки функций группового управления. Статья отражает основные этапы создания аппарата: разработку концепции, моделирование, проектирование и постройку. В рамках концепции «бюджетного» мелосерийного аппарата проработаны функциональные системы/модули АНПА-М с учетом доступности оборудования и комплектующих (по требуемым техническим характеристикам и их стоимости). Определен внешний облик АНПА-М, позволяющий выполнить компоновку всех необходимых систем, узлов и механизмов аппарата в минимальных габаритах. Для выбранного внешнего облика и проектных габаритов аппарата выполнен анализ гидродинамических и прочностных характеристик. Обтекание аппарата в вязкой жидкости моделировалось с использованием пакета OpenFoam. Для оценки мореходных и эксплуатационных качеств проведено исследование динамических свойств аппарата путем имитационного моделирования основных эксплуатационных режимов плавания с использованием пакета Ship Dynatics. Моделирование прочностных характеристик сухих модулей аппарата выполнено в пакете Ansys. Рабочее проектирование аппарата (систем, узлов и механизмов) осуществлено в САПР SolidWorks. В рамках проекта разработана программно-аппаратная архитектура информационной системы аппарата, а также модель взаимодействия аппарата с волновым глайдером и постом берегового управления. Результатами работ являются два натурных экспериментальных образца АНПА-М, предназначенных для работы в группе совместно с волновым глайдером, выполняющим функции ретранслятора сигналов через границу раздела сред вода-воздух. По итогам работ определены пути дальнейших исследований по рассматриваемой тематике.

Морская мультиагентная сенсорно-коммуникационная сеть; морская роботизированная платформа; автономный обитаемый подводный аппарат класса микро; волновой глайдер-ретранслятор; групповые миссии.

V.Yu. Zanin, I.V. Kozhemyakin, Yu.P. Potekhin, I.A. Putintsev, V.A. Ryzhov,
N.N. Semenov, M.N. Chemodanov

DEVELOPMENT MICRO AUTONOMOUS UNDERWATER VEHICLES WITH CONTROL GROUP FUNCTION

Results of the work carried out by Saint-Petersburg State Marine Technical University in the framework of initiative topic, connected with complex researches in maintenance of creation of a multi-agent sensory-communication network based on marine robotic platforms (MRP), are presented. To the MRP the following autonomous unmanned transport/measurement/communication/ support platforms are assigned: underwater gliders, buoys and probes of variable buoyancy, wave gliders, bottom and ice communication stations, docking units of autonomous mobile objects, autonomous underwater vehicles (AUV), unmanned surface vehicles. Altogether the MRP listed above form a complex of technical arsenal – efficient elements of the global marine multi-agent sensory-communication network. In the context of the works mentioned, creation of a micro autonomous underwater vehicle (micro AUV) is considered. High maneuverability, the availability of a modular architecture and functions of the group use are required for the developed micro AUV. The article describes steps of the vehicle creation: concept development, modeling, design and construction. Within the framework of the concept of a “budget”, limited serial product, functional systems/modules of micro AUV are worked out, taking into account the availability of equipment and components (concerning required technical characteristics and their cost). An external appearance of micro AUV has been determined, which allows the assembly of all systems, units and mechanisms of the device in minimum dimensions. For the selected external appearance and design dimensions of the device, the simulation of hydrodynamic and strength characteristics was performed. The flow around the vehicle in a viscous liquid was simulated using the OpenFoam CFD package. To assess the seaworthy and operational qualities, the dynamic properties of the micro AUV research is carried out by simulating the basic operational modes of navigation using the Ship Dynamics package. Simulation of the strength characteristics of the dry modules of the vehicle is performed in the Ansys package. Working design of the vehicle (systems, mechanical components and mechanisms) is carried out in CAD SolidWorks. Within the framework of the project, a software and hardware architecture of the information system of the vehicle was developed, as well as a model of interaction between the micro AUV, the wave glider and costal control station. The work results in two full-scale experimental sample of micro AUV capable of working in a group together with the wave gliders, performing the functions of a repeater signal through the environmental boundary. Based on the results, ways for further work on the subjects are being determined.

Marine multi-agent sensory-communication network; marine robotic platform; micro autonomous underwater vehicle; wave glider-retranslator; group missions.

Введение. В 2016 году в СПбГМТУ был выполнен инициативный проект в развитие исследовательских работ [1–4] по созданию мультиагентной сенсорно-коммуникационной сети морских роботизированных платформ. В рамках проекта была разработана математическая и имитационная модель взаимодействия разнородных роботов, изготовлены образцы автономных необитаемых подводных аппаратов класса микро (АНПА-М), выполняющих функции подводных агентов сети, а также перенесены алгоритмы управления с имитационной модели управления на реальные объекты управления. В результате был разработан комплекс натуральных экспериментальных образцов автономных необитаемых аппаратов, состоящий из волнового глайдера, являющегося шлюзом для передачи информации между подводной средой и радиоэфиром, группы АНПА-М, являющейся основным исполнителем задач поиска объектов и мониторинга среды, а также подводного глайдера.

Новизной реализованного проекта является как разработка модульного АНПА в калибре 100 мм, обладающего способностью самостоятельно обнаруживать объекты на дне, так и объединение открытой группы разнотипных роботов в самоорганизующуюся сеть, устойчивую как к изменению количества взаимодействующих роботов, так и к низкой скорости взаимодействия, зависящей от взаимного расположения роботов между собой и гидрологии.

Значимость работы определяется разработкой новых структурных, алгоритмических и технических решений, полученных в рамках проекта, постройкой натуральных экспериментальных образцов автономных необитаемых подводных аппаратов, способных работать в группе.

Инициативный проект СПбГМТУ, выполненный в 2016 г. в развитие научно-исследовательских работ [1–4] по созданию мультиагентной сенсорно-коммуникационной сети базирующейся на морских роботизированных платформах, нацелен на разработку группового комплекса натуральных экспериментальных образцов автономных необитаемых подводных аппаратов класса микро (АНПА-М), выполняющих функции подводных агентов сети.

При реализации проекта к разрабатываемым АНПА предъявлялись следующие общие требования:

- ◆ модульная архитектура аппарата, с возможностью изменения состава полезной нагрузки (переконфигурации аппарата);
 - ◆ позиционирование и навигация с использованием волнового глайдера-ретранслятора;
 - ◆ возможность работы аппаратов в группе МРП;
 - ◆ наличие радиоканала для обмена данными в надводном положении;
 - ◆ наличие носового гидролокатора для обнаружения препятствий;
 - ◆ наличие системы технического зрения;
- также предъявлялись требования к ТТХ:
- ◆ глубина погружения – до 50 метров;
 - ◆ автономность – не менее 1,5 часов;
 - ◆ масса – не более 10 кг;
 - ◆ максимальная скорость – не менее 2 узлов.

Полезная нагрузка аппарата предполагалась состоящей из основной части, присутствующей в любых конфигурациях аппарата, и опциональных частей. К основным компонентам полезной нагрузки были отнесены СТД датчик и система технического зрения, к опциональным – гидролокатор бокового обзора, сенсор электромагнитных полей, а также другие системы/сенсоры по требованию заказчика.

Управление аппаратами должно осуществляться с поста берегового управления как в подводном, так и надводном положениях.

В результате выполненных исследований были разработаны концепция и модель использования разрабатываемого АНПА-М в составе группировки МРП, выполнено математическое моделирование определяющих характеристик аппарата, осуществлено проектирование, изготовление и сборка двух натуральных экспериментальных образцов аппаратов, проработана программно-аппаратная архитектура информационной системы аппарата.

В статье приводится описание основных этапов реализации проекта.

1. Внешний облик аппарата. Разработка внешнего облика АНПА осуществлялась с учетом следующих особенностей: назначение – высокоманевренный модульный аппарат класса микро для выполнения специальных миссий в составе группировки МРП.

Был проведен анализ существующих проектов АНПА класса микро, с целью выбора гидродинамической формы разрабатываемого аппарата, его функциональных возможностей. На Рис.1. представлено несколько альтернативных решений зарубежных аппаратов класса микро: Jeff platform (проект CoCoRo) [5], Vortex (проект Hydromea) [6], ecoSUB μ & ecoSUB m (проект компаний Planet Ocean, Marine Robotics Innovation, National Oceanography Centre, ASV ltd, University of Southampton) [7]. Приведенные аппараты отличаются внешним обликом, массогабаритными характеристиками и возможностями по переконфигурации, но при этом все они разрабатывались для решения задач группового использования.



Рис. 1. Слева направо: Jeff platform (проект CoCoRo), Vortex (проект компании Hydromea), ecoSUB μ & ecoSUBm (проект компаний Planet Ocean, Marine Robotics Innovation, National Oceanography Centre, ASV ltd, University of Southampton)

С учетом анализа доступного оборудования и комплектующих (по техническим характеристикам и цене), был сделан вывод, что разработка полнофункционального АНПА-М группового использования в массогабаритах аппаратов Jeff и Vortex не возможна: отсутствуют компактные пропульсивные устройства (RIM), гидроакустические и др. системные компоненты российского производства, а цена зарубежных компонент, разрабатываемых под заказ, весьма высока для создания массово тиражируемого (группового) аппарата.

Вследствие вышесказанного, была выбрана торпедная форма аппарата, допускающая использование доступных комплектующих как по массогабаритным характеристикам, так и по их стоимости.

Прорабатывалось несколько вариантов торпедной гидродинамической компоновки АНПА-М:

- ◆ с одним маршевым движителем (гребным винтом), вертикальными носовыми рулями и двумя вертикальными подруливающими устройствами (ПУ);
- ◆ с маршевым плавниковым движительно-рулевым комплексом и двумя вертикальными ПУ;
- ◆ с двумя маршевыми движителями (гребными винтами), расположенными в кормовой оконечности и двумя вертикальными ПУ;
- ◆ с двумя маршевыми движителями (гребными винтами), расположенными в кормовой оконечности, двумя вертикальными и двумя горизонтальными ПУ.

С учетом обеспечения требуемых технических характеристик АНПА в качестве базовой была выбрана гидродинамическая схема с двумя маршевыми движителями, расположенными в кормовой оконечности и двумя вертикальными ПУ, рис. 2.

2. Архитектура аппарата. В виду многообразия задач, стоящих перед разрабатываемым аппаратом, а также жестких массогабаритных ограничений, была выбрана модульная архитектура.

Для АНПА-М в базовой конфигурации был определен следующий состав модулей, рис. 2:

- ◆ носовой модуль;
- ◆ модуль носовой системы изменения плавучести (СИП);
- ◆ модуль носового вертикального подруливающего устройства (ПУ);
- ◆ модуль электроники и гидроакустики;
- ◆ модуль энергообеспечения;
- ◆ модуль кормового вертикального ПУ;
- ◆ модуль кормовой СИП;
- ◆ кормовой модуль.

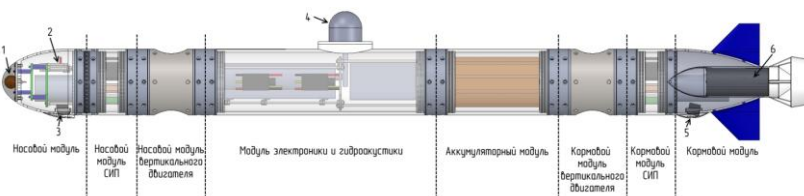


Рис. 2. Модульная архитектура микро АНПА (1 – впередсмотрящий ультразвуковой сонар, 2 – датчики крена, дифферента, давления и температуры, 3 – носовой осветитель, 4 – антенна гидроакустического модема, 5 – кормовой осветитель, 6 – маршевый двигательный комплекс)

Состав оборудования/комплектующих, входящих в соответствующие модули аппарата приведен в табл. 1.

Таблица 1

Состав оборудования/комплектующих модулей АНПА-М

№	Носовой модуль	Оборудование	Кол-во
1	Носовой модуль	Впередсмотрящий ультразвуковой сонар	1
2		Носовой свет	1
3		Датчик давления, температуры, курса, крена и дифферента	1
4	Модуль носовой СИП	Шаговый двигатель	1
5	Модуль носового вертикального подруливающего устройства	Бесколлекторный двигатель	1
6		Гребной винт вертикального ПУ	1
7	Модуль электроники и гидроакустики	Процессорный модуль	1
8		Плата расширения для процессорного модуля	1
9		Радиомодуль wifi	1
10		Гидроакустический модем	1
11		Драйвер бесколлекторного двигателя	4
12		Драйвер шагового двигателя	2
13		Модуль видеокамеры	1
14	Аккумуляторный модуль	Аккумуляторная сборка с платой заряда, защиты и управления	1
15	Модуль кормового вертикального подруливающего устройства	Бесколлекторный двигатель	1
16		Гребной винт вертикального ПУ	1
17	Модуль кормовой СИП	Шаговый двигатель	1
18	Кормовой модуль	Осветитель	1
19		Бесколлекторный двигатель (маршевый)	2
20		Гребной винт (маршевый)	2

3. Функциональные системы аппарата. Коротко остановимся на основных функциональных системах аппарата.

Система изменения плавучести (СИП), обеспечивающая регулировку плавучести АНПА-М для его позиционирования на заданном горизонте глубин. СИП представляет собой управляемый с помощью привода поршень, который изменяет сухой объем аппарата. Приводом является биполярный шаговый двигатель FL35ST28-0504A [8] с драйверами Geckodrive G250X [8].

Аппарат имеет два модуля СИП – носовой и кормовой. Конструктивно эти модули идентичны и взаимозаменяемы. Максимальный объем цилиндра каждого модуля 50 мл. Таким образом, общий изменяемый сухой объем аппарата – 100 мл.

В качестве системы позиционирования и навигации АНПА-М выбрана гидроакустическая система позиционирования с короткой базой (USBL). Ввиду того, что в рамках разработанной модели использования группа **АНПА-М функционирует в составе робототехнического комплекса, включающего волновой глайдер-ретранслятор, то обеспечение позиционирования подводных объектов осуществляется через USBL-модем, расположенный на надводном модуле волнового глайдера.**

Подобные системы позиционирования производят многие компании – Sonardyne [9], Kongsberg [10], EvoLogics [11], IXBLUE [12], Nautronix [13], EASYTRAK [14] и др. Точность позиционирования у систем перечисленных производителей не хуже 1 % от текущей дистанции, дальность от 1000м до 6000м и более. Среди перечисленных выделяются гидроакустические модемы компании EvoLogics, которые обеспечивают точность 0,01м по дистанции и 0,1° по углу во всем рабочем диапазоне. Поэтому для межредного шлюза был выбран модем EvoLogics S2C 42/65 USBL.

Система гидроакустической связи строилась исходя из принципов минимизации массогабаритов устройства, обеспечения устойчивой связи на расстоянии до 2000 м и скорости передачи информации не менее 9600 бит/с. Последнее обусловлено необходимостью передавать не только команды, но и изображения для их анализа в реальном масштабе времени. В результате для разрабатываемого аппарата был выбран модем компании EvoLogics S2C 42/65 OEM серии М, который на приемлемой дальности связи (до 2000 м) и глубинах до 200 м позволяет передавать информацию со скоростью до 31600 бит/с, [11], рис. 3.



Рис. 3. Слева направо: сборка плат электроники и антенна гидроакустического модема EvoLogics S2CM 42/65 OEM; радиомодуль WiFi D-Link DWA-137/A1

Система надводной радиосвязи построена на базе WiFi модуля D-Link DWA-137/A1 с подключаемой внешней антенной, рис. 3. Данный выбор обусловлен обеспечением простоты и надежности соединения радиомодуля и процессорного модуля путем использования usb-разъема.

Система обнаружения препятствий (впередсмотрящий ультразвуковой сонар) была разработана и изготовлена исходя из габаритных размеров, отведенных под пьезоэлектрическую антенну, расположенную в носовом модуле аппарата и необходимых технических характеристик.

Задачей сонара является формирование зондирующего импульса на рабочей частоте, прием отраженного сигнала и формирование импульса по обнаруженному принятому сигналу. Расчет расстояния до преграды производится на вычислительном модуле по задержке импульса отраженного сигнала относительно зондирующего.

Разработанный сонар может формировать несколько стробов по отраженным сигналам, чтобы исключить обнаружение сигнала реверберации в мутной воде. Рабочая частота сонара выбиралась исходя из габаритов лоцируемых объектов, размеров антенны, которую можно разместить на АНПА, а также максимальной дальности, которую необходимо определять. Так, при максимальной дальности 10 метров, круглой полусферической антенне радиусом 20 мм и объектах локации более 50 мм была выбрана частота 460 кГц. Длительность сигнала посылки определяется вычислительным модулем и была принята 20 мкс, что соответствует разрешающей способности сонара 30 мм, но точность определения дистанции может быть выше. Ширина характеристики направленности составляет 70°. Изображение вычислительного модуля и пьезоэлектрической антенны сонара приведены на рис. 4.

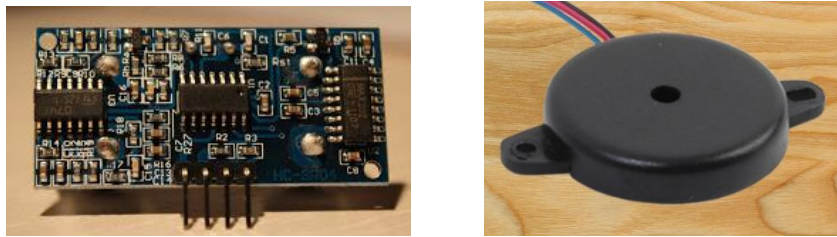


Рис. 4. Плата вычислительного модуля ультразвукового сонара и пьезоэлектрическая антенна сонара

Бортовым вычислителем (процессорным модулем) аппарата служит плата Beaglebone Black [15], работающая под управлением ОС Linux, рис. 5. Основными достоинствами платы являются: компактность и большое количество встроенной периферии (USB, Ethernet, 2 модуля реального времени, 6 ШИМ-генераторов, SPI, 4 UART и пр.).

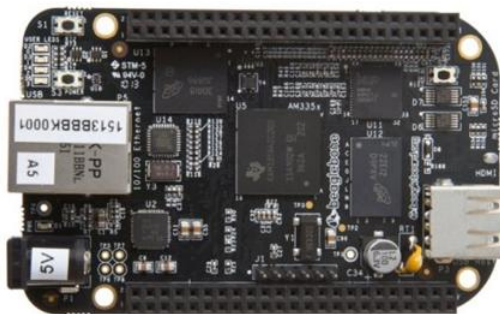


Рис. 5. Процессорный модуль Beaglebone Black

Для обеспечения эффективной работы процессорного модуля дополнительно была разработана плата расширения, обеспечивающая работу в диапазоне питания системы энергообеспечения, защиту платы от бросков напряжения, а также соединение с сенсорами.

Сенсор давления, температуры, курса, крена и дифферента, расположенный в носовом модуле, построен на основе модуля OpenROV IMU/Compass/Depth Module [16], рис.6.

Данный модуль представляет собой распаянные на малогабаритной плате модули BNO055 (компас, МЭМС гироскоп и акселерометр, производство Bosh), а также модуль MS5837-30BA (датчик давления и температуры, производства TE Connectivity). Модуль хорошо зарекомендовавшие себя в эксплуатации на ранее разработанном авторами ТНПА [17]. Выбранный модуль в своем габаритном диапазоне сопоставим с лидерами по заявленным характеристикам и обеспечивает необходимые ТТХ аппарату.

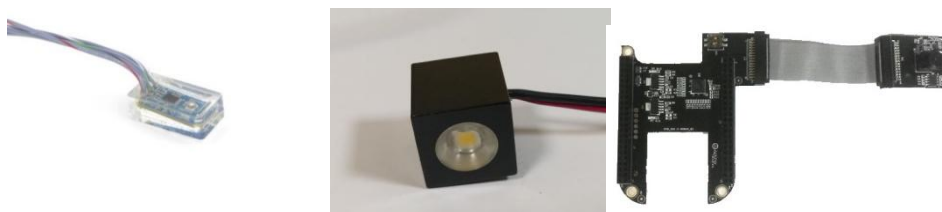


Рис. 6. Слева направо: датчик давления, температуры, крена и дифферента (OpenROV IMU/Compass/Depth Module); осветитель (OpenROV External Light Cube); модуль видеочамеры (Aptina RB HD Camera Cape/ BeagleBone Black A0-01)

Система технического зрения включает в себя модуль видеочамеры, носовой и кормовой осветители.

В качестве модуля видеочамеры была выбрана плата Aptina RB HD Camera Cape for BeagleBone Black A0-01 [18], как обладающая наибольшей светочувствительностью из всех доступных плат расширений для выбранного процессорного модуля, рис.4. В качестве носовых (и кормовых) осветителей системы технического зрения были использованы модули OpenROV External Light Cube, рис. 6. [19].

Структурная схема системы энергообеспечения АНПА-М представлена на рис. 7.

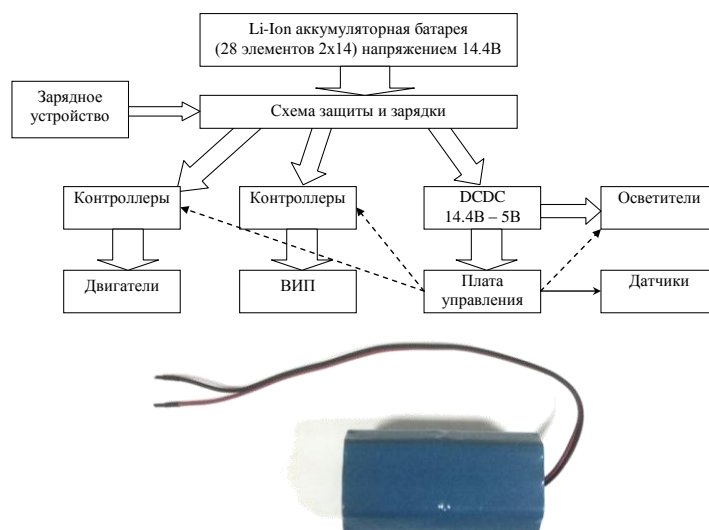


Рис. 7. Слева направо: структурная схема системы энергообеспечения АНПА-М; аккумуляторная сборка

Система энергообеспечения АНПА построена на аккумуляторных элементах типа Li-Ion. В качестве базового элемента использовался элемент Samsung 18650, который благодаря своим геометрическим характеристикам позволил достаточно эффективно заполнить пространство батарейного модуля.

Для получения требуемого напряжения и емкости используется 28 таких элементов. В результате сборка АКБ обеспечивает напряжение 14.8В и емкость 18.2 Ач, что дает требуемое энергопотребление в течении 1,5 часов, Рис.7. Аккумуляторная сборка дополнена платой балансировки напряжений при заряде, контроля тока разряда и защиты от переразряда.

Пропульсивная система построен на двух маршевых винтовых движителях CrustCrawler 400HFS [20], рис. 8, расположенных в кормовом модуле аппарата.



Рис. 8. Двигательно-движительный комплекс CrustCrawler 400 HFS с гребным винтом и насадкой

Бесколлекторный двигатель комплекса работает на глубинах до 100 м, движитель создает максимальный упор 45,3Н. Входящая в комплект кольцевая насадка была заменена на насадку собственной разработки для улучшения ГДХ и использования другого конструктивного решения ее крепления к корпусу. Для управления бесколлекторными двигателями были использованы драйверы Blue Robotics Basic 30A ESC [21], позитивный опыт работы с которыми был получен авторами в ходе реализации проекта ТНПА [17].

Модуль *подруливающего устройства* построен на базе бесколлекторного двигателя Turnigy Aerodrive DST-700 [22] с соответствующим драйвером.

4. Проектные габаритные характеристики аппарата. Использование указанных выше комплектующих определило общие габаритные характеристики модулей аппарата и АНПА-М в сборе, эти данные для базовой комплектации приведенные в табл. 2.

Таблица 2

Общие габаритные характеристики АНПА-М в базовой комплектации

№	Наименование характеристики	Значение	Размерность
1	Габаритная длина аппарата	1230	мм
2	Габаритный диаметр цилиндрической части	100	мм
3	Полная габаритная ширина аппарата (по кормовым стабилизаторам)	177	мм
4	Количество модулей (в базовой комплектации)	8	шт.

5. Моделирование основных характеристик аппарата. Для выбранной конфигурации и проектных габаритных характеристик аппарата было выполнено моделирование гидродинамических и прочностных характеристик аппарата.

Обтекание аппарата в вязкой жидкости моделировалось с использованием пакета OpenFoam [23]. Твердотельная модель аппарата строилась в программном комплексе SolidWorks 2013 [24] и затем для построения сеток импортировалась в

сеточный генератор HexPress [23]. Для расчёта сил на исследуемых режимах обтекания аппарата в рамках схемы URANS использовался нестационарный солвер pisoFoam с моделью турбулентности $k-\omega$ SST. Были проведены систематические расчеты ГДХ АНПА-М с целью оптимизации его гидродинамической формы. В результате моделирования были уточнены обводы носового модуля аппарата, обводы и расположение обтекателей маршевых движителей кормового модуля.

Для уточнения тактико-технических характеристик АНПА-М, относящихся к его мореходным и эксплуатационным качествам выполнено расчетное исследование динамических свойств аппарата путем имитационного моделирования основных эксплуатационных режимов плавания с использованием программного обеспечения Ship Dynamic (СПБГМТУ).

В целях предварительного гидродинамического анализа была выполнена оценка круговых значений гидродинамических сил и моментов в продольно-вертикальной и продольно-горизонтальной плоскостях. Программное обеспечение Ship Dynamic генерирует гидродинамические характеристики на основе информации о форме объекта. Некоторые результаты расчетов сил и моментов приведены на рис. 9.

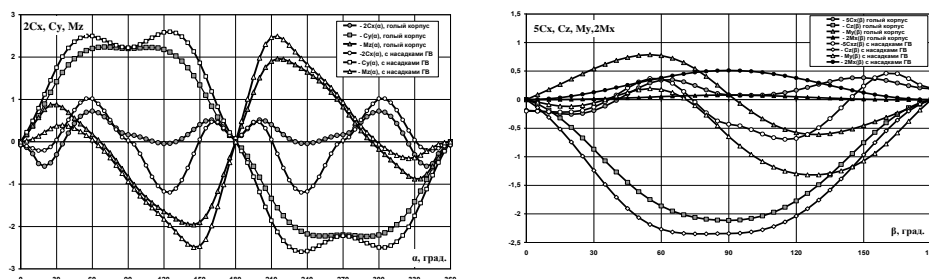


Рис. 9. Позиционные гидродинамические характеристики АНПА-М в продольно-вертикальной плоскости (слева) и продольно-горизонтальной плоскости (справа)

По результатам выполненных расчетов можно уверенно заключить, что динамическая устойчивость прямолинейного движения АНПА-М обеспечивается и в вертикальной, и в горизонтальной плоскостях, что является чрезвычайно важным условием качественного автоматизированного управления движением объекта в режимах перехода к цели, поиска, мониторинга участка акватории и зависания. Необходимый уровень демпфирующих составляющих гидродинамических характеристик вполне обеспечивается насадками гребных винтов, не требуя установки дополнительных элементов кормового оперения. Что касается непосредственно позиционных гидродинамических характеристик, то можно отметить, что они, в целом, имеют вполне традиционный вид для объектов подобного типа.

В целях оценки динамических свойств АНПА-М были смоделированы наиболее характерные эксплуатационные режимы плавания, на основе которых сформулированы предварительные выводы о ходовых и маневренных качествах аппарата. В качестве примера на рис.10 приведены характерные результаты выполнения двух маневров: поворота аппарата по курсу и перехода аппарата по глубине.

Выполненные динамические расчеты позволили сделать следующие выводы для разработанной архитектуры аппарата:

- ◆ Имеющийся движительно-рулевой комплекс обеспечивает вполне удовлетворительную управляемость АНПА-М в горизонтальной и вертикальной плоскостях на ходу и в режиме зависания.

- ◆ Переходные процессы имеют аperiodический характер, что не вызывает излишнего расхода энергии на стабилизацию колебаний.
- ◆ Аperiodический характер переходных процессов подтверждает предварительное заключение о достаточности уровня демпфирующих гидродинамических реакций, обеспечиваемых выбранной архитектурой АНПА-М.
- ◆ Крен АНПА-М на циркуляции не превышает 0,3 градуса, что благоприятно для эксплуатации средств наблюдения за обстановкой.
- ◆ Быстродействие системы имеет резервы для повышения посредством оптимизации алгоритмов управления.
- ◆ При сильных маневрах по глубине на ходу (переходах на 5 метров и более) быстродействие системы имеет тенденцию к существенному росту, вследствие создания на переходе существенных углов дифферента.

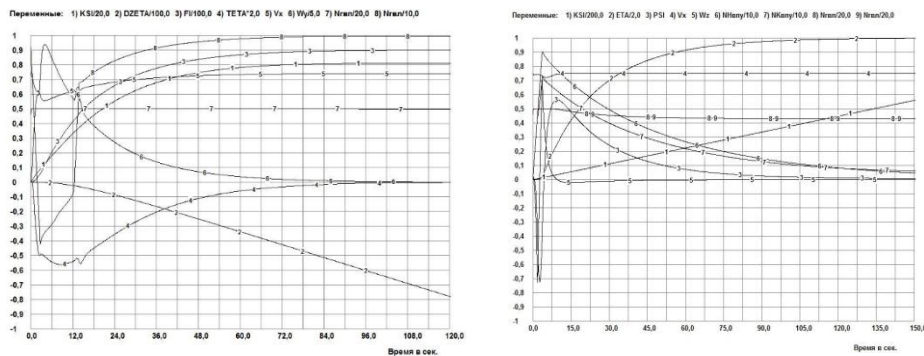


Рис. 10. Поворот АНПА-М по курсу на 90 градусов на скорости хода 1,5 узла (слева); переход АНПА-М на 2 метра по глубине со скоростью хода 1,5 узла (справа).

Было выполнено моделирование прочностных характеристик корпуса аппарата. Прочным элементом корпуса подводного аппарата является цилиндрический модуль (труба) из акрилового стекла с наружным диаметром 100 мм и толщиной стенки 5 мм, ограниченный переборками из сплава АмГ5.

Расчеты на прочность и жесткость цилиндрического модуля прочного корпуса аппарата были проведены в программном комплексе SolidWorks 2013 (приложение Simulation) методом конечных элементов. Расчеты проводились на расчетную глубину погружения 50 м, рис. 11.

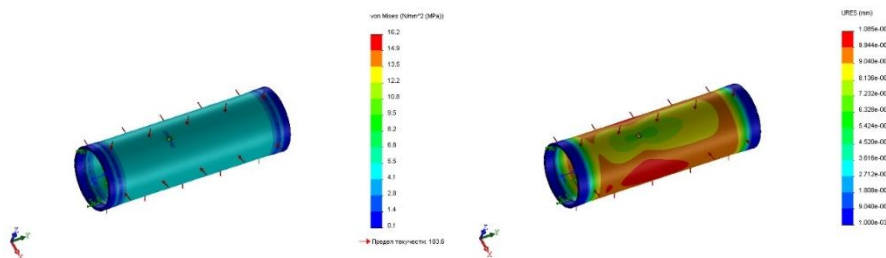


Рис. 11. Эпюра напряжений и эпюра перемещений в цилиндрическом модуле прочного корпуса аппарата (модуль электроники и гидроакустики)

6. Рабочее проектирование аппарата. Конструктивные элементы модулей аппарата, механические системы и механизмы разрабатывались в САПР SolidWorks 2013. В данной системе была разработана 3D модель аппарата, подготовлен комплект необходимой рабочей документации.

Была выполнена помодульная компоновка, обеспечивающая оптимальное размещение необходимого оборудования/компонентов в заданных габаритах. При проектировании была обеспечена требуемая плавучесть, что достигалось рациональным выбором материалов и геометрических характеристик конструктивных элементов. На стадии разработки конструкции была проработана универсальность сборки аппарата в случае замены (исключения или добавления) какого-либо модуля.

3-D модели спроектированных модулей прочного и легкого корпуса представлены на рис. 12,13. К «сухим» модулям АНПА-М относятся, рис. 12: модуль электроники и гидроакустики, модуль энергообеспечения (АКБ), модуль СИП; к «мокрым» модулям, рис. 13 – носовой модуль, модуль ПУ, кормовой модуль.

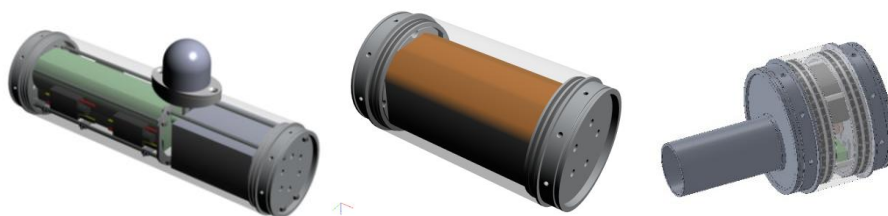


Рис. 12. 3D-модели разработанных модулей прочного корпуса (слева направо): электроники и гидроакустики, энергообеспечения (АКБ), СИП



Рис. 13. 3D-модели разработанных «мокрых» модулей: носовой модуль, модуль ПУ, кормовой модуль

7. Изготовление и сборка аппарата. С использованием разработанной рабочей документации были изготовлены требуемые конструктивные элементы корпуса, механические элементы систем и узлов, проведено насыщение модулей комплектующими и электроникой, выполнена сборка аппарата. Внешний вид АНПА-М (в базовой комплектации) представлен на рис. 14.



Рис. 14. Внешний вид АНПА-М (в базовой комплектации)

8. Программно-аппаратная архитектура информационной системы аппарата. Функциональность программно-аппаратного комплекса условно разделяется на два уровня – верхний и нижний. Функциональность (подпрограммы) условного нижнего уровня отвечают за базовые элементы функционирования аппарата обеспечивающие безаварийную работу аппарата, защиту от выхода за допустимые диапазоны работы, а также функционирование высокоуровневых подпрограмм. Основным отличием функциональности нижнего уровня от функциональности верхнего уровня является то, что нижний уровень сам по себе не отвечает за решение задачи, а лишь обеспечивает возможность выполнения задач высокого уровня.

К базовым функциональностям (подпрограммам) относятся:

- ◆ удержание заданной глубины;
- ◆ переход между различными эшелонами глубин;
- ◆ удержание заданного дифферента;
- ◆ избегание столкновений с препятствиями прямо по курсу;
- ◆ определение собственных координат;
- ◆ движение к точке с заданными координатами;
- ◆ распознавание объектов на дне.

К функциональностям (подпрограммам) высокого уровня относятся:

- ◆ построение маршрута обследования заданной периметром акватории;
- ◆ информирование ПБУ о изменении статуса миссии (объект найден в выделенной зоне, объект не найден);
- ◆ изменение режима работы по команде ПБУ;
- ◆ возвращение аппарата на базу.

Аппаратная архитектура информационной сети АНПА-М выполнена по топологии «звезда», в которой роль центрального модуля сети выполняет плата процессора Beaglebone black, а роль периферийных элементов - сенсоры и исполнительные устройства. Связь между центральным модулем и периферийными устройствами обеспечивается по различным каналам связи: SPI, I2C, ШИМ, UART.

Коротко остановимся на аппаратной архитектуре каждого из модулей аппарата.

Носовой модуль содержит датчики давления, температуры, магнитного компаса, крена и дифферента, объединенные SPI-шиной. Также в этом модуле расположен пьезоэлемент впередсмотрящего сонара, соединенного парой проводов с расширением центрального процессора. Яркость носового источника освещения регулируется ШИМ-сигналом, рис. 15.

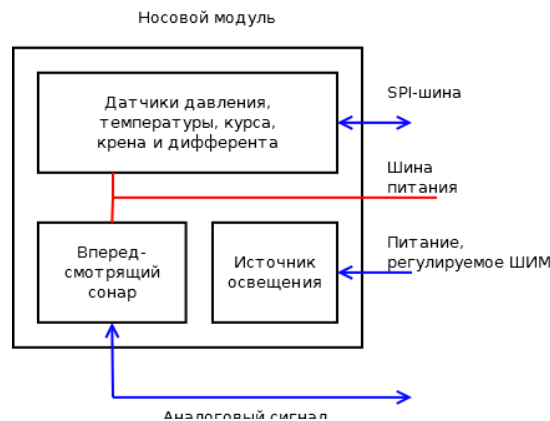


Рис. 15. Функциональная схема носового модуля

Носовой и кормовой модули СИП устроены одинаковым образом. Движение поршня СИП обеспечивается шаговым двигателем, управление шаговым двигателем выполняется при помощи расположенного здесь же драйвера двигателя, управляющий сигнал которого идет от центрального процессора, рис. 16.

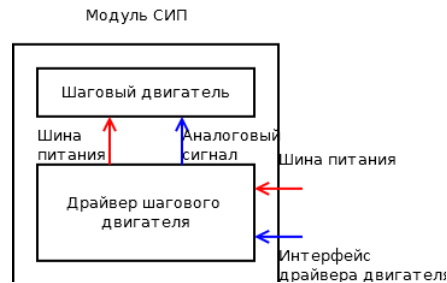


Рис. 16. Функциональная схема модуля СИП

Носовой и кормовой модули вертикальных подруливающих устройств идентичны. Электрическая часть модуля состоит из одного бесколлекторного двигателя, управление которым обеспечивает драйвер двигателя, расположенный в «сухом» модуле электроники и гидроакустики, рис. 17.



Рис. 17. Функциональная схема модуля вертикального ПУ

Модуль электроники и гидроакустики является наиболее нагруженным в плане электроники. Здесь расположен гидроакустический модем, антенна модема крепится также на этом модуле. Помимо этого в модуле имеется центральный процессор, соединенный с камерой и драйверы всех бесколлекторных двигателей, рис. 18.

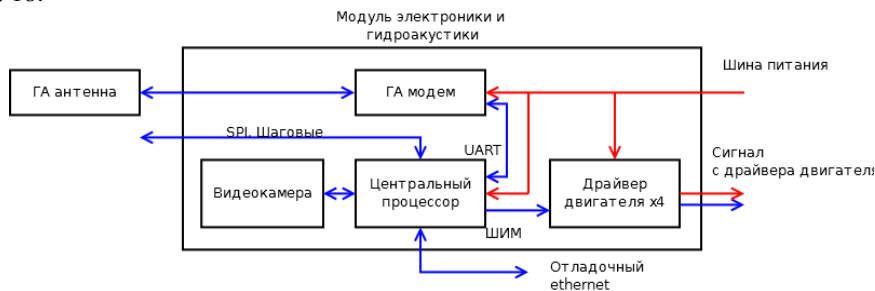


Рис. 18. Функциональная схема модуля электроники и гидроакустики

В кормовом модуле расположены два маршевых двигателя, а также кормовой источник освещения, рис. 19. Управление этими элементами осуществляется аналогично управлению вертикальными подруливающими двигателями и носовым осветителем.



Рис. 19. Функциональная схема кормового модуля

Программное обеспечение аппарата базируется на фреймворке ROS [25].

9. Ретранслятор потока данных от АНПА-М на пост берегового управления.

Ретрансляция потока данных между АНПА-М и ПБУ осуществляется по смешанному гидроакустическому/радио каналу с использованием аппаратуры волнового глайдера, расположенного в районе выполнения миссии группировкой АНПА-М.

Ретрансляция данных между АНПА-М и ПБУ может быть построена либо на полной ретрансляции всех данных между АНПА-М и ПБУ, либо на предварительной обработке и сокращении пересылаемых данных.

Второй вариант предполагает наличие на волновом глайдере-ретрансляторе собственного блока управления, который обменивается информацией с АНПА-М и отвечает за их групповое применение, а на пост берегового управления передается только общая информация о состоянии группы АНПА-М и самого глайдера, а также принимаются команды, которые предстоит выполнить группе аппаратов. Этот вариант делает группу автономной, способной выполнять заданную миссию даже в случае временного отсутствия канала радиосвязи, а также существенно уменьшает количество данных, пересылаемых между ПБУ и волновым глайдером-ретранслятором.

10. Пост берегового управления. Пост берегового управления работает в первую очередь с надводным модулем волнового глайдера-ретранслятора. Обмен информацией между надводным модулем и ПБУ осуществляется по радиоканалу WiFi, рис. 20.

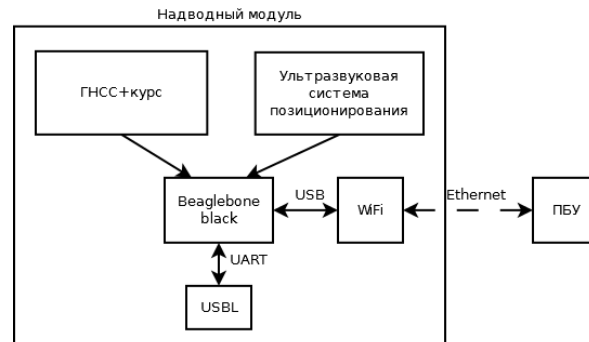


Рис. 20. Обмен информацией между надводным модулем волнового глайдера и ПБУ

Для определения координат подводных аппаратов надводному модулю волнового глайдера необходимо знать свои собственные координаты и курс, для чего в реальных условиях предполагается использовать спутниковый приемник координат и курса, а в условиях испытаний в опытовом бассейне – ультразвуковую систему для позиционирования внутри помещения.

Для связи модуля USBL (с системой позиционирования) и ПБУ используется микрокомпьютер Beaglebone Black (аналогичный процессорному модулю, размещенному на АНПА-М). В качестве ПБУ используется ноутбук с ОС Linux и специальным программным обеспечением.

Программное обеспечение состоит из ПО для платы Beaglebone black и ПО для ПБУ.

ПО для BeagleBone Black написано на языке программирования Python 2.7, и формирует данные о координатах и курсе в NMEA-формате, а также обеспечивает трансляцию сообщений между USBL и ПБУ.

ПО для ПБУ базируется на разработке NS2 фирмы Nonius Engineering [26], и обеспечивает следующие основные возможности, рис. 21:

- ◆ отображение положений: подводных аппаратов, надводного модуля волнового глайдера-ретранслятора, района поиска;
- ◆ возможность задания района поиска;
- ◆ отправка команд аппарату по выполнению миссии (возврат на базу, задание нового района и т.д.).

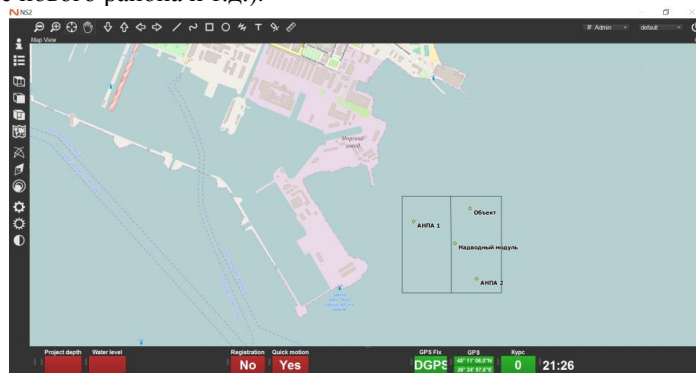


Рис. 21. Скриншот экрана ПБУ (ПО NS2)

Заключение. В рамках реализуемого СПбГМТУ проекта создания АНПА с функцией группового управления были решены следующие задачи:

- ◆ разработана концептуальная модель совместного использования группы АНПА класса микро и волнового глайдера-ретранслятора в рамках мультиагентной сенсорно-коммуникационной сети;
- ◆ проработан внешний облик и модульная архитектура АНПА-М;
- ◆ выполнено эскизное проектирование АНПА-М;
- ◆ проведена расчетная оценка гидродинамических, прочностных, акустических, энергетических характеристик АНПА-М;
- ◆ проработаны базовые функциональные модули АНПА-М;
- ◆ проработано системное наполнение базовых модулей АНПА-М;
- ◆ выполнено рабочее проектирование корпусных конструкций и их элементов, систем и механизмов АНПА-М;
- ◆ изготовлены конструктивные элементы корпусной конструкции АНПА-М, детали и механические части систем аппарата;
- ◆ проработана программно-аппаратная архитектура информационной системы АНПА-М;
- ◆ изготовлены электронные компоненты и программное обеспечение системы управления АНПА-М;
- ◆ выполнена сборка двух АНПА-М;

- ◆ проработана функциональность и архитектура поста берегового управления;
- ◆ проработано техническое решение, обеспечивающего проведение экспериментов с комплексом МРП в опытовом бассейне;
- ◆ разработан план дальнейших работ по доработке и испытаниям АНПА-М в опытовом бассейне СПбГМТУ.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Исследования в обеспечение создания информационно-измерительной системы на основе необитаемых подводных аппаратов типа «глайдер». Отчеты по 1,2,3 этапам НИР, НИЧ СПбГМТУ, № гос. рег. 01201280856, 2012-2014.
2. Экспериментальные исследования в обеспечение создания автономного необитаемого аппарата типа волновой глайдер. Отчет по НИР, НИЧ СПбГМТУ, 2015.
3. *Кожемякин И.В., Рождественский К.В., Рыжов В.А.* Волновой глайдер, как элемент морской глобальной информационно-измерительной системы // Материалы Десятой научно-практической конференции «Перспективные системы и задачи управления». – Таганрог: Изд-во ЮФУ, 2015. – С. 101-112.
4. *Кожемякин И.В., Рождественский К.В., Рыжов В.А.* Разработка технической платформы глобальной морской информационно-измерительной системы на основе автономных необитаемых аппаратов типа глайдер // Российские инновационные технологии для освоения углеводородных ресурсов континентального шельфа. – 2016. – С. 91-108.
5. CoCoRo Project (Collective Cognitive Robots). – URL: <http://cocoro.uni-graz.at/drupal/> (дата обращения: 20.01.2017).
6. Hydromea Project. – URL: <http://www.hydromea.com/> (дата обращения: 20.01.2017).
7. ecoSUBm & ecoSUBm Project. – URL: <https://phys.org/news/2016-11-mini-robot-unveiled-national-oceanography.html> (дата обращения: 20.01.2017).
8. FL35ST28-0504A. <http://electroprivod.ru/fl39st.htm> (дата обращения: 20.01.2017).
9. Sonardyne. <https://www.sonardyne.com/product/scout-usbl-underwater-tracking-system/> (дата обращения: 20.01.2017).
10. Kongsberg. <https://www.kongsberg.com/ks/web/nokbg0240.nsf/AllWeb/25018037CECB16D9C125738D004D0BAA?OpenDocument> (дата обращения: 20.01.2017).
11. EvoLogics. <https://www.evologics.de/en/products/USBL/index.html> (дата обращения: 20.01.2017).
12. IXBLUE. <https://www.ixblue.com/products/usbl-positioning-systems> (дата обращения: 20.01.2017).
13. Nautronix. <http://www.nautronix.com/product/nasdrill-usbl> (дата обращения: 20.01.2017).
14. EASYTRAK. <http://www.appliedacoustics.com/product/easytrak-usbl-systems/> (дата обращения: 20.01.2017).
15. Beaglebone Black. <https://beagleboard.org/black> (дата обращения: 20.01.2017).
16. OpenROV IMU/Compass/Depth Module. <https://store.openrov.com/products/openrov-imu-depth-module> (дата обращения: 20.01.2017).
17. *Igor Kozhemyakin, Kirill Rozhdestvensky, Vladimir Ryzhov, Nikolay Semenov.* Mikhail Chemodanov Educational Marine Robotics in SMTU // In: Interactive Collaborative Robotics: Proceedings of First International Conference, ICR 2016, Budapest, Hungary, August 24-26, 2016. Lecture Notes in Computer Science. – 2016. – Vol. 9812. – P. 79-88.
18. Aptina RB HD Camera Cape for BeagleBone Black A0-01. <http://www.ti.com/devnet/docs/catalog/endequipmentproductfolder.tsp?actionPerformed=productFolder&productId=19580> (дата обращения: 20.01.2017).
19. OpenROV External Light Cube. <https://store.openrov.com/products/external-light-cube> (дата обращения: 20.01.2017).
20. CrustCrawler 400HFS. <http://www.crustcrawler.com/products/urov2/> (дата обращения: 20.01.2017).
21. Blue Robotics Basic 30A ESC. <https://www.bluerobotics.com/store/thrusters/besc-30-r1/> (дата обращения: 20.01.2017).
22. Turnigy Aerodrive DST-700. <http://www.parkflyer.ru/ru/product/1204250/> (дата обращения: 20.01.2017).
23. OpenFoam. <http://www.openfoam.com/> (дата обращения: 20.01.2017).

24. SolidWorks 2013. <https://www.solidworks.com/sw/education/education-edition-2013-2014-overview.htm> (дата обращения: 20.01.2017).
25. ROS. <http://www.ros.org/> (дата обращения: 20.01.2017).
26. Nonius Engineering Company. Smart approach to overwater and underwater works. – URL: <http://noniusgroup.ru/en/products/relief-software/> (дата обращения 20.01.2017).

REFERENCES

1. Issledovaniya v obespechenie sozdaniya informatsionno-izmeritel'noy sistemy na osnove neobitaemykh podvodnykh apparatov tipa «glayder» [Research for support the creation of the information and measuring system based on the "glider" type autonomus unmanned underwater vehicles], *Otchety po 1,2,3 etapam NIR, NICH SPbGMTU, № gos. reg. 01201280856, 2012-2014* [Technical Reports on 1,2,3 stages, R&D Dept., SMTU, № 01201280856, 2012-2014 (in russian)].
2. Eksperimental'nye issledovaniya v obespechenie sozdaniya avtonomnogo neobitaemogo apparata tipa volnovoy glyayder [Experimental studies for support the creation of the wave glider-type autonomus unmanned vehicles],. *Otchet po NIR, NICH SPbGMTU, 2015* [Technical Reports on 1,2,3 stages, R&D Dept., SMTU, № 01201280856, 2012-2014 (in russian)].
3. *Kozhemyakin I.V., Rozhdestvenskiy K.V., Ryzhov V.A. Volnovoy glyayder, kak element morskoy global'noy informatsionno-izmeritel'noy sistemy* [he wave gliders as the marine global information and measurement system elements], *Materialy Desyatoy nauchno-prakticheskoy konferentsii «Perspektivnye sistemy i zadachi upravleniya»* [Materials of the Tenth scientific and practical conference "advanced systems and control problems"]. Taganrog: Izd-vo YuFU, 2015, pp. 101-112.
4. *Kozhemyakin I.V., Rozhdestvenskiy K.V., Ryzhov V.A. Razrabotka tekhnicheskoy platformy global'noy morskoy informatsionno-izmeritel'noy sistemy na osnove avtonomnykh neobitaemykh apparatov tipa glyayder* [Development of the technical platform of the global maritime information and measuring system based on the glider-type autonomus unmanned vehicles], *Rossiyskie innovatsionnye tekhnologii dlya osvoeniya uglevodorodnykh resursov kontinental'nogo shel'fa* [Russian innovative technologies for the development of hydrocarbon resources of the continental shelf], 2016, pp. 91-108.
5. CoCoRo Project (Collective Cognitive Robots). Available at: <http://cocoro.uni-graz.at/drupal/> (accessed 20 January 2017).
6. Hydromea Project. Available at: <http://www.hydromea.com/> (accessed 20 January 2017).
7. ecoSUBμ & ecoSUBm Project. Available at: <https://phys.org/news/2016-11-mini-robot-unveiled-national-oceanography.html> (accessed 20 January 2017).
8. FL35ST28-0504A. Available at: <http://electroprivod.ru/fl39st.htm> (accessed 20 January 2017).
9. Sonardyne. Available at: <https://www.sonardyne.com/product/scout-usbl-underwater-tracking-system/> (accessed 20 January 2017).
10. Kongsberg. Available at: https://www.km.kongsberg.com/ks/web/nokbg0240.nsf/AllWeb/25018037CE_CB16D9C125738D004D0BAA?OpenDocument (accessed 20 January 2017).
11. EvoLogics. Available at: <https://www.evologics.de/en/products/USBL/index.html> (accessed 20 January 2017).
12. IXBLUE. Available at: <https://www.ixblue.com/products/usbl-positioning-systems> (accessed 20 January 2017).
13. Nautronix. Available at: <http://www.nautronix.com/product/nasdrill-usbl> (accessed 20 January 2017).
14. EASYTRAK. Available at: <http://www.appliedacoustics.com/product/easytrak-usbl-systems/> (accessed 20 January 2017).
15. Beaglebone Black. Available at: <https://beagleboard.org/black> (accessed 20 January 2017).
16. OpenROV IMU/Compass/Depth Module. Available at: <https://store.openrov.com/products/openrov-imu-depth-module> (accessed 20 January 2017).
17. *Igor Kozhemyakin, Kirill Rozhdestvenskiy, Vladimir Ryzhov, Nikolay Semenov. Mikhail Chemodanov Educational Marine Robotics in SMTU, In: Interactive Collaborative Robotics: Proceedings of First International Conference, ICR 2016, Budapest, Hungary, August 24-26, 2016. Lecture Notes in Computer Science, 2016, Vol. 9812, pp. 79-88.*

18. Aptina RB HD Camera Cape for BeagleBone Black A0-01. Available at: <http://www.ti.com/devnet/docs/catalog/endequipmentproductfolder.tsp?actionPerformed=productFolder&productId=19580> (accessed 20 January 2017).
19. OpenROV External Light Cube. Available at: <https://store.openrov.com/products/external-light-cube> (accessed 20 January 2017).
20. CrustCrawler 400HFS. Available at: <http://www.crustcrawler.com/products/urov2/> (accessed 20 January 2017).
21. Blue Robotics Basic 30A ESC. Available at: <https://www.bluerobotics.com/store/thrusters/besc-30-r1/> (accessed 20 January 2017).
22. Turnigy Aerodrive DST-700. Available at: <http://www.parkflyer.ru/ru/product/1204250/> (accessed 20.01.2017).
23. OpenFoam. Available at: <http://www.openfoam.com/> (accessed 20 January 2017).
24. SolidWorks 2013. Available at: <https://www.solidworks.com/sw/education/education-edition-2013-2014-overview.htm> (accessed 20 January 2017).
25. ROS. Available at: <http://www.ros.org/> (accessed 20 January 2017).
26. Nonius Engineering Company. Smart approach to overwater and underwater works. Available at: <http://noniusgroup.ru/en/products/relief-software/> (accessed 20 January 2017).

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор Ю.В. Гурьев.

Занин Владислав Юрьевич – ЗАО «Научно-производственное предприятие подводных технологий «Океанос»; e-mail: mfutkflot@gmail.com; 194295, г. Санкт-Петербург, ул. Есенина, 19/2; тел.: +78122923716; советник Генерального директора.

Кожемякин Игорь Владиленич – Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования Санкт-Петербургский государственный морской технический университет; e-mail: 1861vp@mail.ru; 190008, г. Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, 3; тел.: +78127146822; управление оборонных исследований и разработок; начальник управления.

Потехин Юрий Павлович – e-mail: potekhin@smtu.ru; тел.: +78123187877; кафедра теории корабля; заведующий кафедрой; к.т.н.; профессор.

Рыжов Владимир Александрович – e-mail: ryzhov@smtu.ru; тел.: +78124940936; кафедра прикладной математики и математического моделирования; заведующий кафедрой; д.т.н.; профессор.

Семенов Николай Николаевич – e-mail: semenov@smtu.ru; тел.: +78122388873; кафедра морских информационных систем и технологий; к.т.н.; доцент.

Чемоданов Михаил Николаевич – e-mail: chemodanov@smtu.ru; тел.: +78122388873; кафедра морских информационных систем и технологий; ассистент.

Путинцев Иван Андреевич – ЗАО «Научно-производственное предприятие подводных технологий «Океанос»; e-mail: ivanputiin@mail.ru; 194295, г. Санкт-Петербург, ул. Есенина, 19/2; тел.: +78124940936; инженер.

Zanin Vladislav Yur'evich – JSK «Scientific-and-production Enterprise for Underwater Technologies OCEANOS»; e-mail: mfutkflot@gmail.com; 19/2, Esenina street, St. Petersburg, 194295, Russia; phone: +78122923716; Adviser of the General Director.

Kozhemyakin Igor Vladilenovich – Saint-Petersburg State Marine Technical University; e-mail: 1861vp@mail.ru; 3, Lotsmanskaya street, St. Petersburg, 190121, Russia; phone: +78127146822; Division of Defense Research and Development; Head of Division.

Potekhin Yury Pavlovich – e-mail: potekhin@smtu.ru; phone: +78123187877; the department of ship theory; head of department; cand. of eng. sc.; professor.

Ryzhov Vladimir Alexandrovich – e-mail: ryzhov@smtu.ru; phone: +78124940936; the department of applied mathematics and mathematical modeling; head of department; dr. of eng. sc.; professor.

Semenov Nikolay Nikolaevich – e-mail: semenov@smtu.ru; phone: +78122388873; the department of marine information systems and technologies; cand. of eng. sc.; associate professor.

Chemodanov Mikhail Nikolaevich – e-mail: chemodanov@smtu.ru; phone: +78122388873; the department of marine Information systems and technologies; assistant professor.

Putintsev Ivan Andreevich – JSK «Scientific-and-production Enterprise for Underwater Technologies OCEANOS»; e-mail: ivanputiin@mail.ru; 19/2, Esenina street, St. Petersburg, 194295, Russia; phone: +78122923716; engineer.

УДК 629.127

Ю.В. Ваулин, К.З. Лаптев

ОЦЕНКА ТОЧНОСТИ ПЛАВАНИЯ АВТОНОМНОГО НЕОБИТАЕМОГО ПОДВОДНОГО АППАРАТА В ЗАДАННОМ РАЙОНЕ

Современный этап развития подводных технологий, в области создания подводных робототехнических систем, обеспечивает способность автономных необитаемых подводных аппаратов (АНПА) длительное время работать в отдаленных районах Мирового океана. В этой связи оценка точности плавания АНПА становится фактором, который необходимо учитывать при планировании миссии и формировании длительных океанских маршрутов. С учетом существующих требований по навигационной точности, технология решения навигационной задачи и состав навигационного оборудования для автономных необитаемых подводных аппаратов к настоящему времени определены достаточно четко – это комплексирование данных счисления бортовой системы, включающей точный измеритель абсолютной скорости и инерциальную систему, с текущей коррекцией счисленных данных от внешних навигационных систем. Для коррекции используются спутниковые системы на поверхности или гидроакустические – в подводном положении. Последние отличаются конфигурацией гидроакустического оборудования, реализованного обычно в виде опорных маяков с известными или контролируемые географическими координатами. Рассматриваются различные методы и результаты оценки точностных характеристик бортовых средств навигации автономных необитаемых подводных аппаратов, выполненные в условиях специально оборудованного полигона, позволяющие оценить точность счисления пути АНПА в заданном районе плавания. Полигон Института Проблем Морских Технологий располагается в мелководной бухте Амурского залива, в районе г. Владивосток. Полигон оборудован гидроакустической навигационной системой с длинной базой (ГАНС ДБ). Координаты маяков-ответчиков и базовой станции ГАНС ДБ на полигоне установлены с высокой точностью геодезическими методами. Высокоточное измерение координат маяков-ответчиков ГАНС ДБ дает возможность выполнить объективную оценку эффективности скорости звука в районе работ. На основе данных измерений ГАНС ДБ измеряется погрешность всей комплексированной бортовой навигационной системы АНПА. Также дается оценка погрешностей отдельных элементов навигационной системы АНПА, в том числе погрешность доплеровского лага и компаса. В статье рассматривается статистический способ оценки точности счисления АНПА позволяющий оценить влияние внешних факторов на точность измерения координат АНПА.

Автономный необитаемый подводный аппарат; навигация.

Yu.V. Vaulin, K.Z. Laptev

ESTIMATE OF THE AUV NAVIGATION ACCURACY IN THE SPECIFIED AREA

The current stage of development of underwater technologies in the field of creation of underwater robotic systems provides the ability of Autonomous Underwater Vehicles (AUV) to work in remote areas of the Ocean for a long time. In this regard, estimate of the AUV navigation accuracy becomes a factor that needs to be considered when planning a mission and formation of long