

Данный текст является русскоязычной версией опубликованной на английском языке статьи и представлен в авторской редакции только на данном сайте!

UDC 629.58

Doi: 10.31772/2587-6066-2020-21-2-163-169

For citation: Volkov D. A., Sayapin A. V., Safonov K. V., Kuznetsov A. A. Remotely operated underwater vehicle in the form of a quadcopter: features of the design and control system. *Siberian Journal of Science and Technology*. 2020, Vol. 21, No. 2, P. 163–169. Doi: 10.31772/2587-6066-2020-21-2-163-169.

Для цитирования: Дистанционно-управляемый подводный аппарат в форме квадрокоптера: особенности конструкции и системы управления / Волков Д. А., Саяпин А. В., Сафонов К. В., Кузнецов А. А. // Сибирский журнал науки и технологий. 2020. Т. 21, № 2. С. 163–169. Doi: 10.31772/2587-6066-2020-21-2-163-169.

ДИСТАНЦИОННО-УПРАВЛЯЕМЫЙ ПОДВОДНЫЙ АППАРАТ В ФОРМЕ КВАДРОКОПТЕРА: ОСОБЕННОСТИ КОНСТРУКЦИИ И СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ

Д. А. Волков*, А. В. Саяпин, К. В. Сафонов, А. А. Кузнецов

Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева
Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 31

*E-mail: vlkden@yandex.ru

Обследование подводных объектов, таких как подводные археологические памятники, затонувшие технические объекты, технические сооружения, расположенные под водой, требует использования специально подготовленных водолазов, обитаемых или необитаемых дистанционно-управляемых или автономных подводных аппаратов.

Относительно редко используемой конструкцией для таких подводных аппаратов является конструкция квадрокоптера с положительной плавучестью.

В предлагаемой статье рассматривается конструкция и система управления подводного необитаемого дистанционно-управляемого аппарата в форме квадрокоптера. Целью работы является выбор и обоснование формы корпуса аппарата, оптимальной структуры системы управления с расчетом на последующее использование аппарата в качестве автономного.

Описаны потенциальные преимущества выбранной конструкции в форме квадрокоптера с цилиндрическим корпусом, в частности, большой объем герметичного пространства аппарата, возможность установки емких источников питания, потенциальная возможность стабилизации аппарата в заданном положении при наличии течения в месте проведения работ.

Герметичный корпус аппарата предназначен для размещения управляющей электроники, силовой электроники и элементов питания аппарата. Выбор и обоснование формы герметичного корпуса выполнены с использованием аппарата гидростатического моделирования и теоретической механики. В качестве формы герметичного корпуса аппарата выбран цельный цилиндр, выполненный из поликарбоната. Показано преимущество выбранной формы по сравнению с корпусом в форме параллелепипеда при условии одинаковых параметров материала.

Управляющая система аппарата включает в себя программные и аппаратные компоненты. Обоснован выбор аппаратных компонентов, описаны их ключевые характеристики. В качестве управляющего устройства верхнего уровня выбран

одноплатный компьютер (SBC, Single Board Computer) Orange Pi PC, непосредственно управление двигателями аппарата осуществляется при помощи микроконтроллера Cortex-M3. Описана архитектура программного обеспечения аппарата. Выбор архитектуры обусловлен требованиями слабой связности компонентов (что позволяет легко заменять отдельные элементы программного обеспечения без необходимости модификации остальных элементов), простотой потенциальной замены управляющих модулей верхнего уровня (что потенциально позволяет перейти от модели дистанционного управления аппаратом к автономной модели управления). Описаны отдельные компоненты программного обеспечения. Управляющая система реализована на языке высокого уровня Python версии 3.7, основой механизма управления является передача сообщений, в качестве среды обмена сообщениями выбран протокол MQTT с реализацией в виде сервера Mosquitto.

Тестирование аппарата проводилось в бассейнах со стоячей водой и имитацией течения. Тестирование показало необходимость получения опыта для управления подводным аппаратом.

Проведённое исследование позволит в дальнейшем разработать новую версию подводного аппарата с учётом пожеланий и выявленных проблем.

Ключевые слова: робототехника, подводная археология, подводный аппарат, квадрокоптер, система управления, программно-аппаратный комплекс.

REMOTELY OPERATED UNDERWATER VEHICLE IN THE FORM OF A QUADCOPTER: FEATURES OF THE DESIGN AND CONTROL SYSTEM

D. A. Volkov*, A. V. Sayapin, K. V. Safonov, A. A. Kuznetsov

Reshetnev Siberian State University of Science and Technology
31, Krasnoyarskii rabochii prospekt, Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation

*E-mail: vlkden@yandex.ru

Inspection of underwater objects, such as underwater archaeological sites, sunken technical objects, and under water located technical structures, requires the use of specially trained divers, manned or unmanned, remotely operated or autonomous underwater vehicles.

A relatively rarely used design for such underwater vehicles is a design in the form of a quadrotor with positive buoyancy.

This article discusses the design and the control system of the remotely operated underwater vehicle in the form of a quadrotor. The aim of the work is the selection and justification of the shape of the vehicle, the selection of the optimal structure of the control system with the expectation of the subsequent use of the vehicle as an autonomous one.

The potential advantages of the selected design in the form of a quadcopter with a cylindrical body are described, in particular, the large volume of the sealed space of the vehicle, the possibility of installing capacious power sources, the potential for stabilizing the vehicle in a given position if there is a current at the place of work.

The sealed case of the device is designed to place control electronics, power electronics and battery power of the device. The selection and justification of the shape of the sealed enclosure were made using a hydrostatic modeling apparatus and theoretical mechanics. A solid cylinder made of polycarbonate was selected as a form of the sealed housing of the vehicle. The advantage of the selected form in comparison with the parallelepiped-shaped case is shown under the condition of the same material parameters.

The control system of the device includes software and hardware components. The choice of hardware components is justified, their key characteristics are described. As the control device of the top level, a single board computer (SBC, Single Board Computer) Orange Pi PC was selected,

the direct control of the motor of the vehicle is performed using the Cortex-M3 microcontroller. The software architecture of the device is described. The choice of architecture is determined by the requirements of poorly connected components (which makes it easy to replace particular software elements without the need to modify the other elements), the simplicity of the potential replacement of the top-level control modules (which potentially allows switching from a remote control model to an autonomous control model). Some software components are described. The control system is implemented with the high-level language Python version 3.7, the basis of the control mechanism is message passing, the MQTT protocol maintained by the Mosquitto server is selected as a messaging mechanism.

Testing of the vehicle was carried out in pools with standing water and with a simulated current. Testing showed the need to gain experience to control the underwater vehicle.

The study will allow us to further develop a new version of the underwater vehicle, taking into account the wishes and identified problems.

Keywords: robotics, underwater archaeology, underwater vehicle, quadcopter, control system, hardware-software complex.

Введение. В 2016 г. историки-преподаватели СибГУ им. М. Ф. Решетнева Александр Гончаров и Николай Карелин отправились в научно-исследовательскую экспедицию на север Красноярского края в поисках затонувшего английского парохода «Темза», пройдя по реке Енисей и Енисейскому заливу [1]. В результате проведенных исследований было определено местоположение данного парохода, который находится в устье реки Сальная Курья [2].

Александром Гончаровым была предложена идея создать подводный аппарат с дистанционным управлением, предназначенный для обследования подводных объектов, представляющих культурную, историческую или иную ценность.

Команда разработчиков СибГУ им. М. Ф. Решетнева разработала концепцию необитаемого дистанционно-управляемого подводного аппарата в форме квадрокоптера. В 2018 г. прототип данного аппарата (рис. 1) совместно с программным обеспечением был разработан и представлен [3].

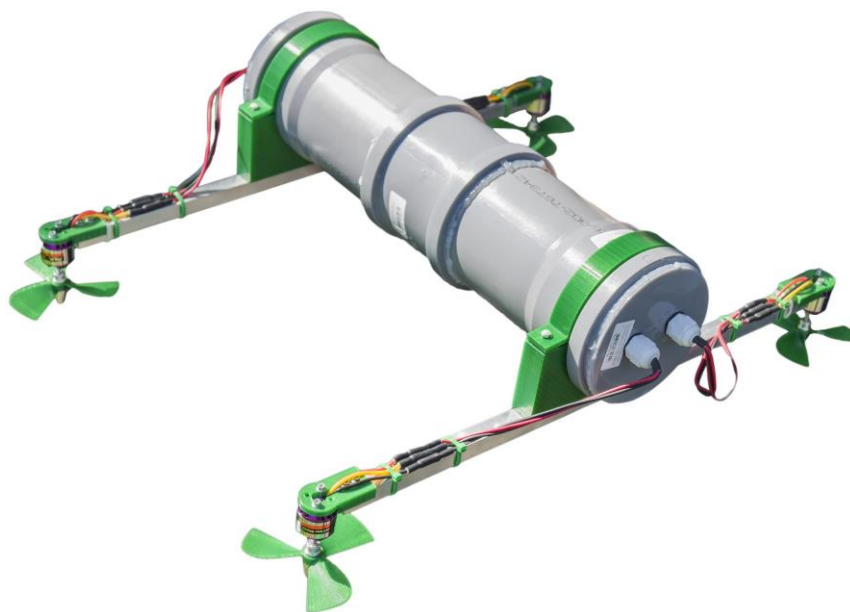


Рис. 1. Разработанный прототип подводного аппарата
Fig. 1. Developed a prototype underwater vehicle

Основное предназначение данного подводного аппарата заключается в возможности проведения подводных археологических исследований.

Достоинством предлагаемой конструкции аппарата в форме квадрокоптера является способность удержания заданного положения и позиции в подвижной водной среде.

Оригинальность данной разработки заключается в совокупности следующих особенностей:

- в основе реализации конструкции подводного аппарата в форме квадрокоптера и его системы управления лежит идея реализации летательных аппаратов;
- для управления подводным аппаратом используется специальное программное обеспечение, доступное для использования на мобильных устройствах и персональных компьютерах;
- предлагаемая концепция подводного аппарата сочетает достоинства привязных и необитаемых подводных аппаратов.

Разработка корпуса. Несущий корпус подводного аппарата реализован в виде полого цилиндра, выполненного из пластика.

Такая форма позволяет выдерживать большое давление водяного столба, причем расчеты показывают, что предельная глубина погружения аппарата обусловлена не формой и материалом несущего корпуса, а особенностями герметизации боковых фланцев.

Первый прототип аппарата был реализован в виде соединённых с помощью муфты полипропиленовых труб, закрытых герметичными крышками.

Рассматривался также вариант корпуса, целиком выполненный с использованием технологий 3D-печати, однако анизотропность корпуса и его относительно малая структурная прочность заставили отказаться от этого подхода.

В дальнейшем предполагается реализовать корпус в виде единого элемента в форме цилиндра, выполненного из поликарбоната, внешним диаметром 110 мм и толщиной стенки 3 мм.

Для данного варианта были проведены расчеты прочности корпуса с использованием методики, опубликованной в [4; 5], показавшие структурную устойчивость корпуса при глубине погружениях до 100 м.

Шасси для компонентов, расположенных внутри корпуса, служит перфорированная металлическая пластина.

На пластине размещены следующие элементы:

- высокотокковый Li-ion (литий-ионный) аккумулятор, использующийся в качестве основного источника питания;
- бортовой компьютер Orange Pi PC;
- управляющий модуль MultiWii NanoWii на основе микроконтроллера с процессором ATmega32U4;
- четыре электронных регулятора скорости, управляющие бесколлекторными моторами, расположенными вне корпуса.

Металлическая пластина-шасси также служит теплоотводом, равномерно распределяя тепло, выделяющееся при работе регуляторов скорости, что способствует его отведению за пределы корпуса.

К основной части корпуса прикреплены два алюминиевых профиля квадратной формы, на концах которых установлены бесколлекторные двигатели с гребными винтами, предназначенные для движения аппарата в водной среде.

Некоторые элементы корпуса, включая гребные винты, были разработаны в программе трёхмерного моделирования OpenSCAD и напечатаны с помощью 3D-принтера. Данный подход при наличии 3D-принтера позволяет получить партию необходимых элементов с целью замены в случае их поломки.

Провода регуляторов скорости, соединяющие двигатели с бортовой системой управления, проведены через гермовводы (сальники), позволяющие предотвратить проникновение воды внутрь корпуса.

Важной задачей является передача видеоизображения с борта подводного аппарата. Для этих целей планируется установка бортовой камеры, подключенной к основному управляющему компьютеру. Это позволит использовать аппарат дистанционно, как телеуправляемый, а в перспективе позволит также реализовать систему автономного управления аппаратом.

Рассматриваются два способа установки камеры на аппарат: внутри несущего корпуса (поскольку он прозрачен), и в отдельном корпусе на внешних конструкциях аппарата. Каждый из подходов имеет свои достоинства и недостатки. Так, установка камеры внутри корпуса позволяет уменьшить число герметичных соединений, что повышает надежность аппарата в целом, однако приводит к необходимости постобработки изображения с камеры, поскольку цилиндрический корпус аппарата вносит искажения. Установка камеры снаружи позволит уменьшить искажения, вносимые корпусом аппарата (или, точнее, снижает требования к объему постобработки изображения с камеры, поскольку камеру предполагается разместить под сферическим куполом), однако создает потенциальные места протечек.

Также, предполагается выполнить оптимизацию формы модели гребного винта и корпуса аппарата [6].

Разработка системы управления. Основными компонентами системы управления являются:

- оператор, рабочее место которого расположено на борту экспедиционного корабля сопровождения или на берегу; рабочее место оборудовано средствами отображения видеопотока с борта подводного аппарата, а также органами управления;
- программный модуль управления верхнего уровня, принимающий команды оператора (или системы автономного управления) и транслирующий их в значения переменных пространства состояния аппарата;
- программное обеспечение низкоуровневого контроллера, обеспечивающего поддержание заданных значений переменных пространства состояния, управляющего работой электронных регуляторов скорости.

Рассмотрим компоненты системы управления подводного аппарата более подробно. Комплекс системы управления состоит из следующих компонентов:

- оператор, использующий устройство с установленным программным обеспечением, предназначенного для управления подводным аппаратом;
- управляющее устройство, в качестве которого может использоваться смартфон, планшет или персональный компьютер с установленным программным обеспечением, разработанным в рамках данного проекта, и предназначенным для отправки сообщений (команд) и приёма видеоизображения с бортовой камеры;
- Wi-Fi роутер, который используется для установки связи между управляющим устройством и бортовым компьютером;
- бортовой компьютер, предназначенный для трансляции видеоизображения с бортовой камеры и приёма сообщений (команд) с управляющего устройства с целью их передачи на контроллеры управления для передвижения аппарата;
- веб-камера, предназначенная для передачи видеоизображения с целью наблюдения за окружающей обстановкой;
- контроллер управления, который используется для передачи значений скорости и положения аппарата в пространстве регуляторам скорости;
- регуляторы скорости (4 шт.), позволяющие осуществлять управление двигателями подводного аппарата с заданной тягой;

– двигатели (4 шт.), позволяющие выполнять движение подводного аппарата в водной среде.

На рис. 2 представлена схема взаимодействия компонентов комплекса системы управления.

Для движения аппарата в водной среде используются четыре регулятора скорости HobbyWing FlyFun 30A и подключенные к ним четыре бесколлекторных двигателя RCX D2830/14 750kv.

Питание электронных компонентов подводного аппарата осуществляется от высокотокового Li-ion (литий-ионного) аккумулятора ёмкостью 1800 мАч.

В качестве бортового компьютера используется одноплатный компьютер (микрокомпьютер) с операционной системой на базе ядра Linux. Изначально в прототипе подводного аппарата использовался микрокомпьютер Raspberry Pi Model B+, однако в дальнейшем он был заменён на модель Orange Pi PC для возможности установки и использования веб-камеры, предназначенной для наблюдения за окружающей обстановкой и (потенциально) распознавания объектов, поскольку для трансляции видеоизображения оптимального качества и работы системы компьютерного зрения требуется более высокая производительность.

Структура программного обеспечения аппарата изложена в работе [7].



Рис. 2. Схема взаимодействия компонентов комплекса системы управления

Fig. 2. Diagram of interaction of components of the control system complex

На данный момент реализованы следующие механизмы управления подводным аппаратом:

- веб-сервер для использования джойстика (геймпада) посредством интерфейса Gamedpad API;
- управление подводным аппаратом при помощи мобильного устройства с операционной системой Android.

Связь рабочего места оператора аппарата с управляющим приложением верхнего уровня реализована с использованием беспроводных и проводных технологий, включающих в себя сеть Wi-Fi для связи рабочего места оператора с Wi-Fi роутером, который, в свою очередь, Ethernet-кабелем связан с бортовым компьютером. Бортовой компьютер и Wi-Fi роутер используют проводное соединение с целью образования единой точки доступа. Таким образом обеспечивается необходимая гибкость связи всех компонентов системы.

Для обмена сообщениями (командами) между управляющим устройством и бортовым компьютером используется протокол MQTT с реализацией в виде сервера Mosquitto.

Для приёма сообщений по протоколу MQTT с управляющего устройства и их передачи на бортовой компьютер с последующей отправкой на управляющий двигателями контроллер была разработана программа на языке программирования Python, предназначенная для использования на бортовом компьютере.

Управление двигателями аппарата с заданными значениями осуществляется при помощи Arduino-совместимого контроллера управления MultiWii NanoWii. Используемое программное обеспечение позволяет циклично получать значения с бортового компьютера и передавать их на регуляторы скорости для управления двигателями аппарата с заданной тягой. Управление осуществляется в связанной системе координат (крен, тангаж, рыскание). Также программа позволяет удерживать горизонтальное положение аппарата в пространстве, используя значения гироскопа и акселерометра с сенсора MPU-6050, встроенного в контроллер управления. При отклонении подводного аппарата от горизонта скорость вращения соответствующих двигателей меняется автоматически с целью возвращения аппарата в горизонтальное положение. Эта способность позволяет защитить аппарат от возможности опрокидывания.

Для управления данным подводным аппаратом разрабатывается и тестируется программное обеспечение для мобильных устройств с операционной системой Android и персональных компьютеров с операционной системой Windows [8].

Программное обеспечение для управления подводным аппаратом позволяет выполнять следующие задачи:

- управление движением аппарата в водной среде;
- отображение потокового видеоизображения с установленной камеры;
- отображение информации, получаемой с установленных датчиков.

Осуществлять управление движением аппарата возможно с помощью интерфейса программы или подключенного джойстика (геймпада).

Тестирование. Данный подводный аппарат неоднократно был протестирован в бассейнах со стоячей водой и имитацией течения. Для тестирования аппарата на корпус были прикреплены два блина для штанги массами 0,2 и 0,5 кг, поскольку на данный момент конструкция аппарата обладает избыточной положительной плавучестью. В будущем это позволит оснастить аппарат дополнительным навесным оборудованием, таким как оборудование для отбора проб воды, датчиками температуры, солей и т. д.

Тестирование в бассейне со стоячей водой показало, что для управления подводным аппаратом необходимо иметь опытного оператора с навыками управления. Установленные двигатели имели высокий запас скорости, поэтому скорость двигателей была ограничена программным способом. При погружении аппарата на глубину до 6 м проблем не возникало.

После нескольких минут нахождения аппарата в водной среде, влаги внутри корпуса не наблюдалось.

Тестирование аппарата в бассейне с имитацией течения глубиной в полметра показало, что управлять подводным аппаратом в таких условиях сложно. Однако в данных условиях аппарат стабилизируется неплохо и способен активно передвигаться. После нескольких испытаний подводного аппарата проблемы, связанные с проникновением воды внутрь конструкции, отсутствовали.

На рис. 3 показан кадр с тестирования прототипа подводного аппарата в бассейне.



Рис. 3. Тестирование прототипа подводного аппарата
Fig. 3. Testing the prototype of the underwater vehicle

Заключение. Разработанный прототип дистанционно-управляемого подводного аппарата в форме квадрокоптера позволил определить жизнеспособность выбранной конструкции аппарата и структуры его управляющей системы. В дальнейшем планируется разработать водонепроницаемый кейс для установки камеры, добавить необходимые датчики, а также установить осветительные приборы. В связи с установкой новых компонентов, система управления подводного аппарата и программное обеспечение будут дорабатываться. Проведённые исследования позволят в дальнейшем разработать новую версию подводного аппарата с учётом пожеланий и выявленных проблем.

Благодарности. Участники данного проекта выражают благодарность за помощь в проведении тестирования подводного аппарата Дворцу водного спорта СибГУ им. М. Ф. Решетнева и кафедре использования водных ресурсов Лесоинженерного факультета СибГУ им. М. Ф. Решетнева.

Acknowledgment. The participants of this project express their gratitude to the Palace of Water Sports of Reshetnev Siberian State University of Science and Technology and the Department of Water Use of the Faculty of Forest Engineering of Reshetnev Siberian State University of Science and Technology for their assistance in testing the underwater vehicle.

Библиографические ссылки

1. Проблемы использования ГИС и ДЗЗ из космоса для выявления памятников полярного судоходства / А. Е. Гончаров, Н. М. Карелин, Д. М. Медников и др. // Вестник СибГАУ. 2016. № 4 (17). С. 956–963.

2. Prospects for using sonar for underwater archeology on the Yenisei: surveying a 19th century shipwreck / A. E. Goncharov, D. M. Mednikov, N. M. Karelin, I. R. Nasyrov // IOP Conf. Ser.: Mater. Sci., 2016, Vol. 155. Doi: 10.1088/1757-899X/155/1/012037.

3. Волков Д. А., Саяпин А. В. Дистанционно-управляемый подводный аппарат для археологических исследований // Робототехника и искусственный интеллект : материалы X Всерос. науч.-техн. конф. с междунар. участием (08 декабря 2018, г. Железногорск) / под науч. ред. В. А. Углева ; Красноярск : ЛИТЕРА-принт, 2018. С. 21–25.

4. ГОСТ 34233.2–2017. Расчет цилиндрических и конических обечаек, выпуклых и плоских днищ и крышек. Введ. 2018–08–01. М. : Стандартинформ, 2018. 58 с.

5. ГОСТ Р 54522–2011. Расчет цилиндрических обечаек, днищ, фланцев, крышек. Рекомендации по конструированию. Введ. 2012–06–01. М. : Стандартинформ, 2012. 27 с.

6. Волков Д. А., Федотова Л. Д. Геометрические и параметрические характеристики дистанционно-управляемого подводного аппарата // Актуальные проблемы авиации и космонавтики : сб. материалов V Междунар. науч.-практ. конф., посвящ. дню космонавтики (08–12 апреля 2019, г. Красноярск) : в 3 т. / под общ. ред. Ю. Ю. Логинова ; Красноярск : СибГУ им. М. Ф. Решетнева, 2019. Т. 2. С. 266–267.

7. Саяпин А. В., Волков Д. А. Программное обеспечение дистанционно-управляемого подводного аппарата для археологических исследований // Робототехника и искусственный интеллект : материалы X Всерос. науч.-техн. конф. с междунар. участием (08 декабря 2018, г. Железногорск) / под науч. ред. В. А. Углева ; Красноярск : ЛИТЕРА-принт, 2018. С. 72–77.

8. Волков Д. А. Разработка прикладного программного обеспечения для управления подводным аппаратом // Актуальные проблемы авиации и космонавтики : сб. материалов V Междунар. науч.-практ. конф., посвящ. дню космонавтики (08–12 апреля 2019, г. Красноярск) : в 3 т. / под общ. ред. Ю. Ю. Логинова ; Красноярск : СибГУ им. М. Ф. Решетнева, 2019. Т. 2. С. 268–270.

References

1. Goncharov A. E., Karelin N. M., Mednikov D. M., Nasyrov I. R. [GIS and satellite remote sensing for archeology: exploring polar history]. *Vestnik SibGAU*. 2016, Vol. 17, No. 4, P. 956–963 (In Russ.).

2. Goncharov A. E., Mednikov D. M., Karelin N. M., Nasyrov I. R. Prospects for using sonar for underwater archeology on the Yenisei: surveying a 19th century shipwreck. *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci.* 2016, Vol. 155. Doi: 10.1088/1757-899X/155/1/012037.

3. Volkov D. A., Sayapin A. V. [Remotely operated underwater vehicle for an archaeological survey]. *Materialy X Vseros. nauch.-tekhn. konf. s mezhdunar. uchastiem "Robototekhnika i iskusstvennyi intellekt"* [Materials X All-Russian Scientific-Technical Conf. with Intern. Participation "Robotics and Artificial Intelligence"]. Krasnoyarsk, 2018, P. 21–25 (In Russ.).

4. GOST 34233.2–2017. *Raschet tsilindricheskikh i konicheskikh obechaek, vypuklykh i ploskikh dnishch i kryshek* [State Standard 34233.2–2017. Calculation of cylindrical and conical shells, convex and flat bottoms and covers]. Moscow, Standartinform Publ., 2018. 58 p.

5. GOST R 54522–2011. *Raschet tsilindricheskikh obechaek, dnishch, flantsev, kryshek. Rekomendatsii po konstruirovaniyu* [State Standard R 54522–2011. Calculation of cylindrical shells, bottoms, flanges, covers. Design Recommendations]. Moscow, Standartinform Publ., 2012. 27 p.

6. Volkov D. A., Fedotova L. D. [Geometrical and paramaterial characteristics of an unmanned underwater vehicle]. *Materialy V Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii "Aktual'nye problemy aviatsii i kosmonavtiki"* [Materials V Intern. Scientific-Practical Conf. "Topical Issues in Aeronautics and Astronautics"]. Krasnoyarsk, 2019, Vol. 2, P. 266–267 (In Russ.).

7. Sayapin A. V., Volkov D. A. [Software of remotely operated underwater vehicle for an archaeological survey]. *Materialy X Vseros. nauch.-tekhn. konf. s mezhdunar. uchastiem "Robototekhnika i iskusstvennyi intellekt"* [Materials X All-Russian Scientific-Technical Conf. with Intern. Participation "Robotics and Artificial Intelligence"]. Krasnoyarsk, 2018, P. 72–77 (In Russ.).

8. Volkov D. A. [Development of the application software for an underwater vehicle control]. *Materialy V Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii "Aktual'nye problemy aviatsii i kosmonavтики"* [Materials V Intern. Scientific-Practical Conf. "Topical Issues in Aeronautics and Astronautics"]. Krasnoyarsk, 2019, Vol. 2, P. 268–270 (In Russ.).

© Волков Д. А., Саяпин А. В., Сафонов К. В., Кузнецов А. А., 2020

Волков Денис Андреевич – магистрант; Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева. E-mail: vlkden@yandex.ru.

Саяпин Александр Владимирович – кандидат технических наук, доцент кафедры прикладной математики; Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева. E-mail: alstutor@gmail.com.

Сафонов Константин Владимирович – доктор физико-математических наук, профессор, заведующий кафедрой прикладной математики; Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева. E-mail: safonovkv@rambler.ru.

Кузнецов Александр Алексеевич – доктор физико-математических наук, профессор, директор Института космических исследований и высоких технологий; Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева. E-mail: alex_kuznetsov80@mail.ru.

Volkov Denis Andreevich – Master's Degree Student; Reshetnev Siberian State University of Science and Technology. E-mail: vlkden@yandex.ru.

Sayapin Aleksandr Vladimirovich – Cand.Sc., Associate Professor at the Department of Applied Mathematics; Reshetnev Siberian State University of Science and Technology. E-mail: alstutor@gmail.com.

Safonov Konstantin Vladimirovich – D.Sc., Professor, Head of the Department of Applied Mathematics; Reshetnev Siberian State University of Science and Technology. E-mail: safonovkv@rambler.ru.

Kuznetsov Aleksandr Alekseevich – D.Sc., Professor, Director of the Institute of Space Research and High Technologies; Reshetnev Siberian State University of Science and Technology. E-mail: alex_kuznetsov80@mail.ru.