

МАЛОГАБАРИТНЫЙ ПОДВОДНЫЙ АППАРАТ ДЛЯ ДИСТАНЦИОННОГО КОНТРОЛЯ ТЕХНИЧЕСКИХ РАБОТ

В. А. МИКЛУШ¹, М. В. СОБОЛЕВ¹, М. А. СПАССКИЙ¹,
С. П. БОРОДАЙ², М. А. ПОЛЕТАЕВА²

¹Российский государственный гидрометеорологический университет,
192007, Санкт-Петербург, Россия
E-mail: miklush-v@yandex.ru

²Крыловский государственный научный центр,
196158, Санкт-Петербург, Россия

Предложен прототип малогабаритного подводного аппарата, предназначенного для контроля за проведением подводно-технических работ. Реализована конструкция прочного и легкого корпуса подводного аппарата с элементами движения, питания и управления по технологии 3D-печати. Разработано программное обеспечение для управления движением подводного аппарата, подводной съемкой и процессами приема и передачи информации. Приведены результаты математического моделирования параметров движения аппарата в водной среде. Определены задачи для корректировки характеристик существующей конструкции и дальнейших проверочных испытаний.

Ключевые слова: подводный аппарат, математическое моделирование, прочный корпус, легкий корпус, сопротивление воды, Arduino Ide

Введение. Активное использование природных ресурсов и их транспортировка по трубопроводам, проложенным по морскому дну, наличие систем коммуникаций, транспортных судоходных магистралей обусловили особый контроль за экологическим состоянием Мирового океана [1]. Наблюдение и обслуживание морских технических объектов осуществляется в условиях реальной морской среды, для которой характерны течения, волнение, глубина (давление), низкие температуры, соленость и пр. Такие условия являются экстремальными для жизни и здоровья человека, в связи с чем в настоящее время динамично развиваются подводные робототехнические комплексы, позволяющие реализовать дистанционный мониторинг [2]. Вовремя выявленные дефекты, деформации, повреждения и коррозия могут значительно снизить стоимость ремонтных работ, а также предупредить экологические катастрофы.

В процессе эксплуатации судов необходимо осуществлять контроль целостности элементов подводной части корпуса для своевременного выявления повреждений и предупреждения аварийной ситуации [3]. Использование подводного аппарата (ПА) в этих целях является быстрым и безопасным способом.

В настоящей статье представлены предложения по реализации прототипа малогабаритного ПА для контроля за проведением подводно-технических работ.

Подводный аппарат. Основная идея разработки заключается в том, чтобы ПА, управляемый посредством кабеля, мог погружаться на заданную глубину в пределах 20 м, свободно перемещаться под массами вод и в реальном времени вести фото- и видеосъемку с выводом на монитор изображений поврежденных фрагментов корпуса судна. Поскольку работа аппарата предполагается в сложных гидрологических условиях, во избежание его потери и нарушения связи с ним, было принято решение об управлении аппаратом посредством кабеля.

Прочный корпус ПА представляет собой прямоугольный параллелепипед, выполненный из PLA филамента (рис. 1, а). Печать прочного корпуса осуществляется с использованием технологии 3D-печати на принтере Creality Ender E5 (рис. 1, б). Общий вид легкого корпуса

ПА приведен на рис. 1, в. В хвостовой части легкого корпуса расположено два винта в гондолах и один хвостовой руль, который позволяет аппарату поворачивать влево/вправо. В передней же части ПА находятся два руля глубины, закрепленные на одной оси, вращение которой позволяет ему всплывать или погружаться. Размеры устройства составляют 200×175×100 мм (Д×Ш×В), вес — 1158 г на суше.

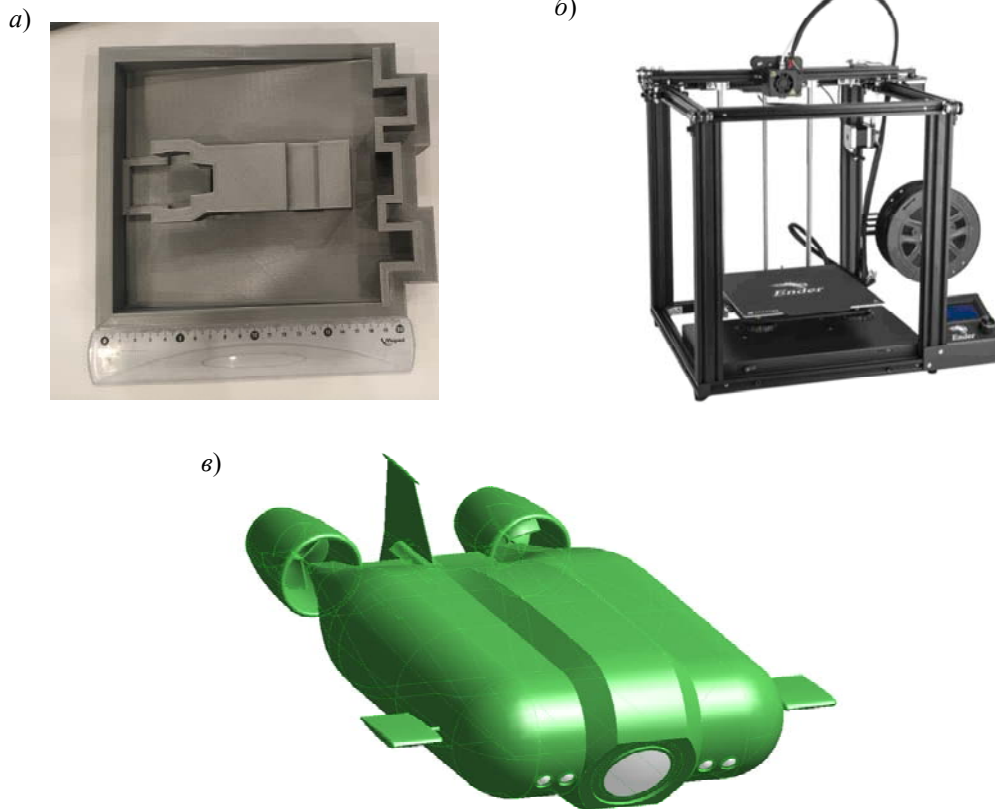


Рис. 1

Основу ПА составляет плата Arduino Mega 2560 rev 3 на микроконтроллере ATmega16u2 (рис. 2), имеющая 54 цифровых порта ввода/вывода (15 из которых могут использоваться как выходы питания), 16 аналоговых портов, 4 серийных порта UART. Управление платой производится с помощью языка программирования C++.

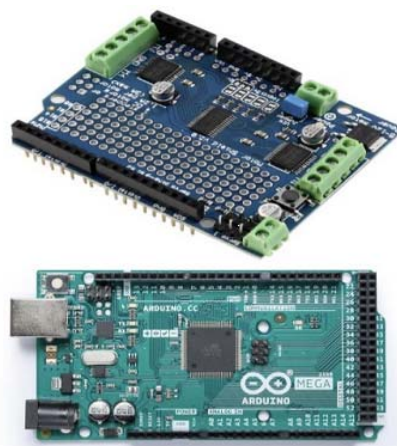


Рис. 2

В качестве двигателей используются два мотора, на которые подается напряжение от 3 до 6 В, обеспечивающее скорость вращения валов от 5000 до 7000 об/мин. Связь с ПА и управление им осуществляются посредством кабеля ШСМ 4×0,08, длиной 21 м. Питание

пульта управления осуществляется с помощью 9В батарейки, тогда как электропитание самого аппарата требует большей мощности. Так как двигатели при работе потребляют большие объемы энергоресурсов, электропитание ПА разделено на две группы: питание основной платы, камеры, sd-card-модуля и питание сервомоторов и двигателей.

Программирование ПА осуществляется на языке C++, тестирование программного кода проводится в среде „Arduino Ide“, обеспечивающей подключение одной и более библиотек, а также возможность отладки программного кода в виртуальной среде [4, 5].

Рассмотрим подробно элементы прототипа ПА.

Плата управления (стоимость 990 р.), имеет следующие технические характеристики:

Рабочее напряжение, В	5
Постоянный ток, мА:	
через вход/выход	40
для вывода 3,3 В	50
Флеш-память, Кбайт	256
ОЗУ, Кбайт.....	8
Энергонезависимая память, Кбайт	4
Тактовая частота, МГц.....	16

Плата пульта управления (стоимость 550 р.), имеет 14 цифровых входных/выходных выводов, 6 аналоговых входных выводов; технические характеристики:

Рабочее напряжение, В	5
Постоянный ток, мА:	
через входные/выходные выводы	20
через вывод 3,3 В.....	50
Флеш-память, Кбайт	32
Оперативная память SRAM, Кбайт.....	2
Энергонезависимая память EEPROM, Кбайт	1
Тактовая частота, МГц.....	16
Вес, г.....	25

Вспомогательный шилд к пульта управления (стоимость 220 р.), имеет 2-осевой джойстик — 4 большие кнопки (А, В, С, D), 2 маленькие кнопки (F, E); интерфейс подключения графического жидкокристаллического дисплея NOKIA 5110; цифровой интерфейс, аналоговый интерфейс; технические характеристики:

Напряжение питания, В	3,3 или 5
Габариты, мм	87×54×18
Вес модуля, г	35

Моторшилд основной платы (стоимость 450 р.), имеет 6 выводов и встроенный „брэд-борд“.

Сервомотор, два, (стоимость 380 р.); технические характеристики:

Напряжение питания, В	4,8—6,0
Момент, кг·см:	
при 4,8 В.....	2,2
при 6 В.....	2,5
Рабочая температура, ...°С.....	–30...+60
Вес, г.....	13,4
Размеры, мм.....	23×12,2×29

Моторы, два, (стоимость 100 р.); технические характеристики:

Напряжение, В.....	3—6
Скорость, об/мин.....	5000—7000
Диаметр вала, мм	2
Размеры, мм.....	38×21×9

Модуль карты памяти (стоимость 103 р.), поддерживаемые типы карт памяти: Micro SD до 2 Гбайт, Micro SDHC до 32 Гбайт; технические характеристики:

Напряжение, В.....	4,5—5,5
Ток номинальный, мА	80
Уровень напряжения интерфейса, В	3,3 или 5
Размеры, мм.....	42×24×12

Модуль камеры (стоимость 530 р.), поддерживается масштабирование изображения; прогрессивная развертка; технические характеристики:

Напряжение питания, В.....	3,3
Ток, мА:	
в активном режиме	20
в режиме сна, менее	20
Размер линзы, ..."	1/6
Угол обзора, ...°	25
Автокомпенсация помехи, Гц	50, 60
Размер модуля, мм	35×34×26
Вес, г.....	12

Кабель (стоимость 270 р.), 3 упаковки.

Сигнальный кабель (стоимость 420 р.); технические характеристики:

Длина, м.....	21
Диаметр жил, мм.....	0,08
Вес, г.....	19,43

Кабель питания (стоимость 15 р.), имеет разъем для контактов; технические характеристики:

Длина, м.....	19
Диаметр, мм.....	3,5

Бокс для 4 батареек АА (стоимость 45 р.) — открытый корпус.

Бокс для 6 батареек АА (стоимость 60 р.) — открытый корпус.

Батарейки (общая стоимость 1050 р.).

Материал корпуса ПА — филамент (стоимость 1700 р.), вес 5 кг.

Общая стоимость элементов ПА — 6883 р.

Математическое моделирование. Для расчета обтекания корпуса ПА, как без винтов, так и с винтами, использовался программный комплекс Ansys CFX 19.2, где решение поставленной задачи выполнено с использованием уравнений Навье — Стокса, осредненных по Рейнольдсу. В качестве модели турбулентности использована модель Ментера с автоматическим выбором пристенного закона ($k-\omega$ SST) [6, 7].

В основу моделирования винтов в гондолах положен метод „скользящих сеток“: вокруг винтов построены замкнутые объемы в форме коротких цилиндров таким образом, чтобы продольные оси цилиндров совпадали с осями вращения винтов. Размер цилиндров выбран исходя из условий, обеспечивающих отсутствие их пересечения с корпусом гондолы и полного включения винта. Зазоры между стенками цилиндра, корпусом гондолы и винтом выбраны достаточными для построения тетраэдральной расчетной сетки как минимум в 10 ячеек и с призматическими слоями вблизи границ (не менее 10 слоев).

На входе в расчетную область задавался линейный профиль скорости, соответствующий скорости течения воды $v=1,2$ м/с, при котором ПА должен был оставаться неподвижным. На выходе из расчетной области определено нулевое избыточное статическое давление. Остальные внешние границы расчетной области определены как „стенка с проскальзыванием“, что позволяет более точно моделировать невозмущенный поток. Плотность несжимаемой жидкости

принята равной $999,99 \text{ кг/м}^3$, что соответствует плотности пресной воды при температуре $+5 \text{ }^\circ\text{C}$. Расчет включает следующие этапы:

- 1) расчет обтекания корпуса без учета работы винтов;
- 2) расчет тяги винта при скорости движения 0 м/с (на швартовых);
- 3) расчет обтекания корпуса с учетом работы винтов при течении воды.

При предварительном расчете для проведения первых корректирующих действий по разработке конструкции получены гидродинамические характеристики ПА. На рис. 3 показано распределение давления в водном пространстве — в области вокруг подводного аппарата в продольном направлении и на поверхности легкого корпуса. На рис. 4 показаны линии тока обтекания корпуса при $v=1,2 \text{ м/с}$.

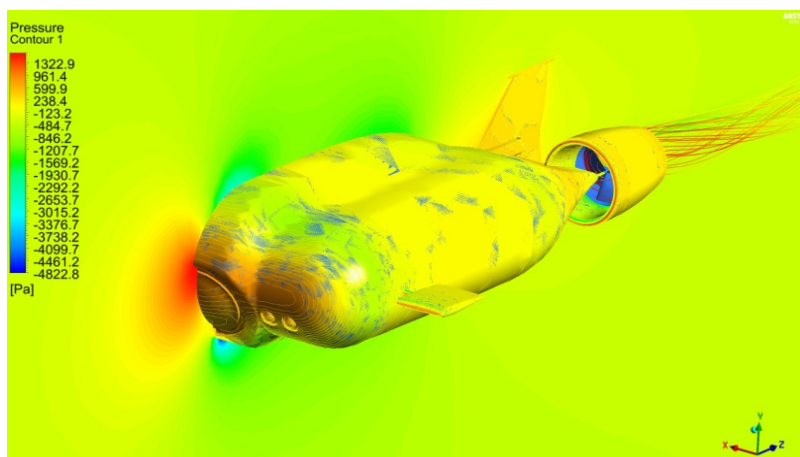


Рис. 3

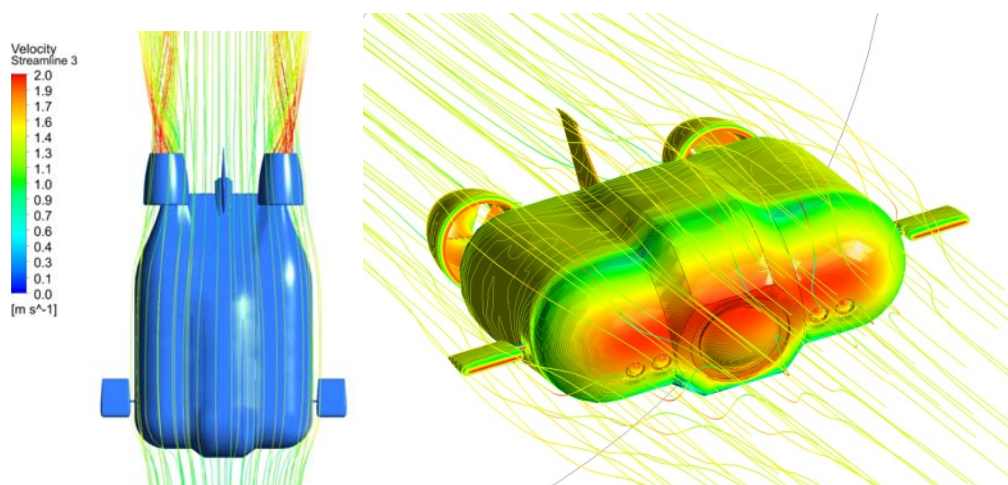


Рис. 4

Электродвигатель через понижающий редуктор, для реализации повышенного момента, обеспечивает на винте скорость 1800 об/мин . Тяговые характеристики левого и правого винтов максимально составляют $\approx 4,15 \text{ Н}$ „на швартовых“ и $\approx 1,97 \text{ Н}$ при $v=1,2 \text{ м/с}$. Необходимый момент на одном винте — $0,27 \text{ Н}\cdot\text{м}$ при максимальной тяге.

Сила сопротивления легкого корпуса ПА при течении воды составляет $4,12 \text{ Н}$, что несколько больше, чем тяговые характеристики винтов. Это подразумевает неспособность выбранных электродвигателей поддерживать заданную скорость движения аппарата, следовательно, требуется сбалансированное проектирование винта редуктора и двигателя [8].

Также в результате расчетов было установлено, что для достижения требуемой плавучести ПА необходимо регулировать баланс массы аппарата в пределах $8,4 \text{ кг}$. Это можно реали-

зовать за счет закрепления балластных пластин в нижней части корпуса ПА. Корпус выбранной формы показал хорошую маневренность.

Заключение. Следующим этапом проектирования ПА является изготовление легкого корпуса, корректировка баланса массы, подбор двигателей и редуктора. Кроме разработки конструкции и выполнения модельных расчетов, важное значение имеет проведение экспериментальных исследований ПА в контролируемых условиях с учетом моделирования реальной морской среды для апробации выбранных технических решений, проверки воздействия различных естественных факторов на управляемость и прочность аппарата, а также валидации численных расчетов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Александров А. А., Ларионов В. И., Суцев С. П. Единая методология анализа риска чрезвычайных ситуаций техногенного и природного характера // Вестн. МГТУ им. Н. Э. Баумана. Сер. Естественные науки. 2015. № 1. С. 113—131.
2. Агеева М. Д. Автономные подводные роботы: системы и технологии. М.: Наука, 2005. 398 с.
3. Sikarev I. A., Garanin A. V. Noise immunity of noncoherent reception under complex interference effect on communication and monitoring channels of automated information systems of river transport on inland waterways of the Russian Federation // Automatic Control and Computer Sciences. 2018. Vol. 52, N 8. P. 1084—1089.
4. Chin R. Arduino and Raspberry Pi Sensor Projects for the Evil Genius. McGraw-Hill Education TAB, 2017. 237 p.
5. Cicolani J. Beginning Robotics with Raspberry Pi and Arduino. Apress Inc., 2018. 372 p.
6. Menter F. R. Two equation eddy-viscosity turbulence models for engineering applications // AIAA Journal. 1994. Vol. 32. P. 1598—1605.
7. Menter F. R., Kuntz M., Langtry R. Ten Years of Industrial Experience with the SST Turbulence Model // Turbulence, Heat and Mass Transfer 4; Ed.: K. Hanjalic, Y. Nagano, M. Tummers. Begell House Inc., 2003.
8. Sikarev I. A., Garanin A. V. General principles of constructing a motion control system for a remotely operated sea vessel in the port area based on the NMEA-2000 network protocol // Automatic Control and Computer Sciences. 2019. Vol. 53. P. 932—936.

Сведения об авторах

- Виктория Александровна Миклуш** — РГГМУ, кафедра информационных технологий и систем безопасности; ст. преподаватель; E-mail: miklush-v@yandex.ru
- Мстислав Владиславович Соболев** — студент, магистр; РГГМУ, кафедра морских информационных систем; E-mail: hardmstizlov@gmail.com
- Марк Александрович Спасский** — студент, магистр; РГГМУ, кафедра морских информационных систем; E-mail: ok.mark@mail.ru
- Сергей Павлович Бородай** — Крыловский государственный научный центр; инженер
- Марина Анатольевна Полетаева** — Крыловский государственный научный центр; научный сотрудник; E-mail: polet.mns@gmail.com

Поступила в редакцию
23.01.2021 г.

Ссылка для цитирования: Миклуш В. А., Соболев М. В., Спасский М. А., Бородай С. П., Полетаева М. А. Малогобаритный подводный аппарат для дистанционного контроля технических работ // Изв. вузов. Приборостроение. 2021. Т. 64, № 5. С. 422—428.

SMALL-SIZED UNDERWATER VEHICLE FOR REMOTE CONTROL OF TECHNICAL WORKS

V. A. Miklush¹, M. V. Sobolev¹, M. A. Spassky¹,
S. P. Boroday², M. A. Poletaeva²

¹Russian State Hydrometeorological University,
192007, St. Petersburg, Russia

E-mail: miklush-v@yandex.ru

²Krylov State Research Center,
196158, St. Petersburg, Russia

A prototype of a small-sized underwater vehicle designed to control the performance of underwater technical works is proposed. The structure of a durable and lightweight body of an underwater vehicle with elements of motion, power, and control is implemented using 3D printing technology. A software is developed to control the underwater vehicle movement, underwater survey, reception and transmission of information. Results of mathematical modeling of the underwater vehicle movement parameters in aquatic environment are presented. Tasks for correcting the characteristics of the existing structure and further verification tests are defined.

Keywords: underwater vehicle, mathematical modeling, durable body, light body, water resistance, Arduino Software (IDE)

REFERENCES

1. Aleksandrov A.A., Larionov V.I., Sushchev S.P. *Herald of the Bauman Moscow State Technical University. Series Natural Sciences*, 2015, no. 1, pp. 113–131. (in Russ.)
2. Ageeva M.D. *Avtonomnyye podvodnyye roboty: sistemy i tekhnologii* (Autonomous Underwater Robots: Systems and Technologies), Moscow, 2005, 398 p. (in Russ.)
3. Sikarev I.A., Garanin A.V. *Automatic Control and Computer Sciences*, 2018, no. 8(52), pp. 1084–1089.
4. Chin R. *Arduino and Raspberry Pi Sensor Projects for the Evil Genius*, McGraw-Hill Education TAB, 2017, 237 p.
5. Cicolani J. *Beginning Robotics with Raspberry Pi and Arduino*, Apress Inc., 2018, 372 p.
6. Menter F.R. *AIAA Journal*, 1994, vol. 32, pp. 1598–1605.
7. Menter F.R., Kuntz M., Langtry R. *Turbulence, Heat and Mass Transfer*, 2003 Begell house Inc.
8. Sikarev I.A., Garanin A.V. *Automatic Control and Computer Sciences*, 2019, vol. 53, pp. 932–936.

Data on authors

- | | |
|----------------------------|--|
| Viktoria A. Miklush | — Russian State Hydrometeorological University, Department of Information Technology and Security Systems; Senior Lecturer;
E-mail: miklush-v@yandex.ru |
| Mstislav V. Sobolev | — Student, Master; Russian State Hydrometeorological University, Department of Marine Information System;
E-mail: hardmstizlov@gmail.com |
| Mark A. Spassky | — Student, Master; Russian State Hydrometeorological University, Department of Marine Information System; E-mail: ok.mark@mail.ru |
| Sergey P. Boroday | — Krylov State Research Center; Engineer |
| Marina A. Poletaeva | — Krylov State Research Center; Senior Scientist;
E-mail: polet.mns@gmail.com |

For citation: Miklush V. A., Sobolev M. V., Spassky M. A., Boroday S. P., Poletaeva M. A. Small-sized underwater vehicle for remote control of technical works. *Journal of Instrument Engineering*. 2021. Vol. 64, N 5. P. 422–428 (in Russian).

DOI: 10.17586/0021-3454-2021-64-5-422-428