

Галушко И.Д.,
Салмина В.А.,
Макарьянц Г.М.

Самарский национальный
исследовательский университет
имени С.П. Королева
ул. Московское шоссе, д. 34,
г. Самара, Российская Федерация
443086
neeva2804@gmail.com
salmina.va@yandex.ru
georgy.makaryants@gmail.com

РАЗРАБОТКА ПОДХОДА К УПРАВЛЕНИЮ СТРУКТУРОЙ ПРИСТЕНОЧНЫХ ТЕЧЕНИЙ

Разработка опытного образца подводного робота с изменяемой геометрией тела представляет собой крупную комплексную задачу, включающую целый ряд задач научно-технического, инженерно-конструкторского и прикладного характера, а также создание новых автоматических систем для управления им. Создание такого робота обеспечит его высокую автономность и маневренность. В данной работе представлена разработанная твердотельная модель гибридного автономного необитаемого подводного аппарата с изменяемой геометрией тела. Также представлено экспериментальное исследование геометрических параметров корпуса робота в зависимости от величины давления, подаваемого в пневматическую систему, интегрированную в анизотропный корпус.

Ключевые слова: пневматический мускул; подводная робототехника; анизотропный корпус; пневматика; изменяемая геометрия

1 Введение

Для подводных движущихся аппаратов в последние три десятилетия остро встала проблема энергетической эффективности и акустической бесшумности. Решение этих проблем неразрывно связано с решением задач динамики и виброакустики, возникающих при обтекании подводных тел потоком жидкости [1]. К таким задачам относят задачу возникновения пульсаций давления и скорости, распределённых по поверхности объекта, а также шума и вибраций, вызванных этими пульсациями [2]. Для создания энергоэффективных и малошумных подводных движущихся роботов необходимо создание методов воздействия на структуру пристеночных течений и форму аэродинамических поверхностей робота с целью снижения его поверхностного трения, а также полного сопротивления. Поэтому задача управления конфигурацией и геометрической формой подводного объекта при его движении в потоке жидкости является актуальной. Недавние исследования в области биомиметической робототехники показали большой потенциал в решении проблем динамики и виброакустики, возникающих вследствие обтекания потоком жидкости

погруженного тела [3]. Биомиметика — подход к созданию технологических устройств, при котором идея и основные элементы устройства заимствуются из живой природы. Это позволяет исследователям и инженерам использовать более продвинутые принципы движения подводных аппаратов и методы управления ими.

Более того, такой подход для создания автономных подводных биороботов основан на достижениях в трех дисциплинах: нестационарной гидродинамике биологических объектов, технологии искусственных мышц и искусственного нейробиологического контроля. Революция в разработке низкоскоростных, маневренных, бесшумных, легких, энергетически эффективных подводных аппаратов будет базироваться на интеграции указанных направлений [4]. Одним из первых и соответственно простых проектов, нацеленных на создание подводных биомиметических роботов, является проект «Flopper» [5]. "Flopper" - это робот, включающий в себя 3 серводвигателя для симуляции изгибных форм движения рыб. Серводвигатели служат для управления движением тела и хвостового плавника. Движение вперед обеспечивается созданием толкающего импульса, возникающего при

поворотах хвостового плавника в стороны. Silent NEMO - это проект, нацеленный на исследование возможных способов использования автономных подводных биомиметических транспортных средств на флоте. Данное устройство размером с обычную рыбу (тунца) собирало данные при приливах, различных течениях, волнах и различных погодных условиях. Робот способен работать автономно в течение длительного времени, но его также можно контролировать с помощью ноутбука через кабель, как телеуправляемые аппараты. В Массачусетском технологическом институте существует проект RoboTuna, направленный на создание автономных аппаратов, имитирующих движение рыб [6, 7]. Аналогичная разработка под названием «Yellow Tuna» выполнена компанией Draper Laboratory Company. Рыба-робот имеет длину - 2,4 м, массу - 173 кг, скорость до 5 км/ч. Робота-рыбу предполагается использовать для противоминных операций, патрулирования акваторий, ведения разведки и наблюдения, связи с подлодками [8]. Существуют роботы, имитирующие движение медузы, змеи и др. Все вышеописанные роботы имеют лишь один подвижный хвостовой плавник, но с каждым годом ученые все больше и больше создают роботов, которые имеют комплекс движительных приводов для повторения гидродинамических свойств рыб [9].

Поиск и анализ существующих проектов в области биомиметической робототехники по всему миру показал, что большая часть разработанных роботов похожа на рыбу (рисунок 1). Такая форма корпуса является оптимальной с гидродинамической точки зрения и с точки зрения расположения оборудования внутри него [3].

Существуют роботы, имитирующие движение медузы, змеи и др. Все вышеописанные роботы имеют лишь один подвижный хвостовой плавник, но с каждым годом ученые все больше и больше создают роботов, которые имеют комплекс движительных приводов для повторения гидродинамических свойств рыб.

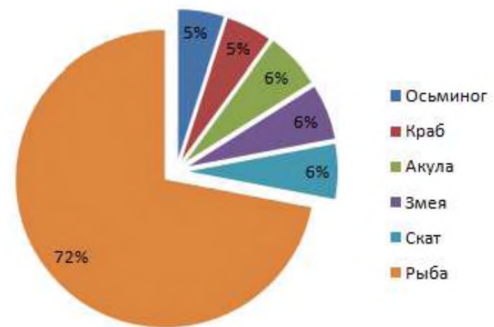


Рисунок 1. Типы тел биомиметических подводных роботов

На рисунке 2 показано, что электромеханические приводы в основном используются в движительных системах этих биомиметических роботов, поскольку они просты и надежны в эксплуатации, имеют минимальные габаритные размеры и являются взаимозаменяемыми. Во всех рассматриваемых проектах роботы получали питание для всех бортовых систем, в основном от аккумуляторов (рисунок 3). Выбор источника питания обусловлен несколькими факторами, такими как: автономность, размер устройства и ограничения по весу. Некоторые устройства большого размера питаются как от батареи с твердым аккумулятором, так и от солнечных батарей, так как их время работы является критическим фактором. Тем не менее, они не требуют значительного технического обслуживания и дорогой перезарядки для длительной эксплуатации.



Рисунок 2. Типы приводов биомиметических подводных роботов



Рисунок 3. Типы источников питания биомиметических подводных роботов

В связи с этим стоят следующие задачи:

1. выбор элементной базы, включая современные датчики, логические контроллеры и приводы;
2. проектирование и создание опытного образца корпуса подводного робота с изменяемой геометрией тела для определения его гидродинамических характеристик;
3. разработка системы управления подводным роботом с изменяемой геометрией тела.

2 Теория управления

Поток, обтекающий объекты в газовой среде, генерирует волновой след за корпусом АНПА вследствие их лобового сопротивления (рис. 4). Эта зона расширяется при удалении от корпуса, при этом она заполняется входным потоком, пристеночным потоком и пристеночными вихрями. Расширение следа обусловлено турбулентным перемешиванием пристеночного и входного потоков. Результатом этого смешивания является увеличение объема жидкости, попадающего за корпус аппарата. Следовательно, вдоль поверхности тела образуются турбулентные вихри и отрывы потока, что является собой дополнительный акустический шум. Снижение коэффициента лобового сопротивления корпуса и коэффициента формы необходимо для уменьшения акустического шума корпуса аппарата на

разных скоростях движения и глубинах погружения. В данной статье предлагается метод варьирования геометрических параметров корпуса аппарата для реализации возможности управления входного и пристеночного потоков.

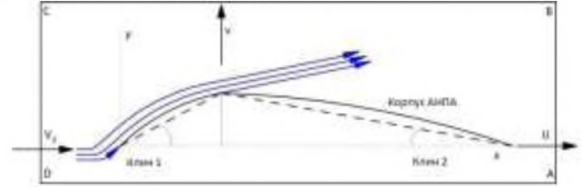


Рисунок 4. Геометрия потока за корпусом АНПА

Стратегия варьирования параметров основана на эмпирических значениях коэффициентов сопротивления. На первом этапе расчёта мы реализовали теорему Джонсона об импульсе. Этот метод отличается от других методов простотой и удобством проведения эксперимента.

Рассмотрим две плоскости, перпендикулярные чертежу (рисунок 4). След за корпусом обозначен линиями CD и AB, удалёнными от тела на значительное расстояние и расположенными перпендикулярно направлению скорости свободного потока V_0 , совпадающего с осью абсцисс. Таким образом, в предположении, что статическое давление в плоскостях CD и AB равно p_0 , скорость в плоскости CD везде равна V_0 ; в плоскости AB она равна U и является переменной в направлении распространения следа в вихревой области за корпусом. Тогда уравнение импульса равно

$$Q = \int_{AB} \rho U (V_0 - U) dy,$$

где ρ - плотность жидкости.

Однако управление идеальной плоскостью AB не имеет смысла для условий эксперимента. Обычно это расстояние составляет не более двух или трех длин корпуса. Принимая это во внимание, теперь предположим, что плоскость управления перпендикулярна направлению следа за корпусом.

Мы предполагаем, что в дорожке следа за корпусом АНПА отсутствуют пульсации струи. Тогда уравнение Бернулли принимает вид:

$$P_1 = p_1 + \frac{\rho U_1^2}{2} = p_0 + \frac{\rho U^2}{2}$$

Учитывая неизменность значения плотности, уравнение непрерывности для единицы ширины можно записать в следующем виде:

$$U_1 dy_1 \cdot 1 = U dy \cdot 1$$

где dy и dy_1 - высоты секций, имеющих единичную ширину. Суммарный гидродинамический напор в начальном разделе CD равен:

$$P_0 = p_0 + \frac{\rho V_0^2}{2}$$

Преобразовав основное уравнение импульса, получим

$$Q = \int_{AB} \rho U_1 (V_0 - u) dy_1 = \rho V_0^2 \int_{AB} \frac{U_1}{V_0} \left(1 - \frac{U}{V_0}\right) dy_1$$

поскольку

$$Q = c_{xp} \frac{\rho}{2} V_0^2 b \cdot 1$$

тогда окончательная форма выражения для коэффициента силы лобового сопротивления, c_{xp} , принимает следующий вид:

$$c_{xp} = \frac{2}{b} \int_{AB} \sqrt{\frac{P_1 - p_1}{P_0 - p_0}} \left(1 - \sqrt{\frac{P_1 - p_0}{P_0 - p_0}}\right) dy_1$$

Для определения и варьирования параметра c_{xp} , необходимо измерить силу лобового сопротивления и параметр статического давления. Значения лобового сопротивления P_0 и статического давления p_0 невозмущённого потока определяются соплом газодинамического управления, расположенным перед корпусом.

3 Разработка анизотропного корпуса

В этом проекте мы предлагаем обеспечить вариативность геометрии тела робота с помощью интеграции пневматической системы на основе пневмомускулов в подводный планер. Это позволяет спроектировать новый тип подводных глайдеров с системой переменной плавучести и анизотропным корпусом.

Современные подводные глайдеры имеют преимущественно вытянутую торпедообразную форму и обладают большей автономностью по сравнению с

винтовыми роботами [10]. В среднем, современные глайдеры потребляют 0.5 Вт мощности на достижение скорости порядка 0.25 м/с. Твёрдотельная 3D-модель разработанного подводного робота представлена на рисунке 5.



Рисунок 5. Внешний вид корпуса

Для того чтобы обеспечить возможность изменения геометрии тела подводного робота, необходим привод, который сможет деформировать корпус, возвращать его в первоначальное состояние, обладать небольшими размерами и легко монтироваться внутри самого корпуса, а также обладать высокой герметичностью. Для этих целей мы использовали пневматические мышцы Festo, что позволило изменять площадь различных участков корпуса робота. Схема разработанной пневматической системы показана на рисунке 6. Для того, чтобы управлять подачей сжатого воздуха в пневматические мускулы необходимы пневматические распределители, причем основным требованием, предъявляемым к распределителям, является наличие электромеханического управления, т.к. управление распределителями будет осуществляться с помощью микроконтроллера. Для того, чтобы контролировать геометрию тела, необходимо подавать давление в диапазоне от 0 до 6 бар в пневматические мускулы. В свою очередь, пневматические мускулы, сокращаясь, будут деформировать алюминиевый корпус робота.

От компрессора (1) по линии (с) сжатый воздух проходил в блок подготовки, включающий в себя фильтр с отводом конденсата (2), регулятор давления (3) и манометр (4). Регулятор давления (3) настраивался в диапазоне от 0 до 6 бар. Значение давления подаваемого воздуха

фиксирувалось с помощью манометра (4). На выходе из блока подготовки по линии (d) воздух подавался в нормально закрытый пневматический распределитель 3/2 (5). После нажатия на кнопку К распределитель (5) переключался из положения а в положение б, сжатый воздух проходил по линиям (f) и (g), после чего попадал в рабочие полости интегрированных в алюминиевый корпус робота пневматических мускулов (6) и (7). Далее снимались значения горизонтальной и вертикальной составляющих деформации корпуса робота, данные заносились в таблицу. После чего, посредством пружинного возврата, распределитель (5) переключался из положения б в положение а, и осуществлялся сброс воздуха из рабочей полости пневмомускулов (6) и (7) по линии (e).

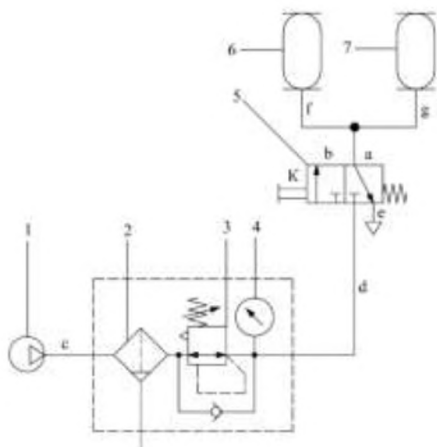


Рисунок 6. Пневматическая схема

Таким образом, разработанный анизотропный корпус прототипа подводного робота обладает следующими свойствами: гибкость каркаса, небольшая масса, минимальный размер для дальнейшей интеграции элементов системы управления и обеспечение возможности управления потоком вокруг корпус.

4 Экспериментальное исследование деформации корпуса

Для определения зависимости геометрических параметров пневматических мышц и корпуса робота от величины подаваемого давления был проведен ряд экспериментов. Полученные результаты для деформации корпуса робота показаны в таблице 1. На основе полученных зависимостей были спроектированы модели тела опытного образца робота, описывающие его геометрию при разных величинах давления в пневматических мускулах. Полученные результаты представлены на рисунке 7.

Таблица 1 – Экспериментальные данные

Р, бар	0	1,6	2,0	2,8	3,6	4,0	4,8	5,6	6,0
Величина горизонтальной деформации корпуса, мм									
Hor, мм	77	112	118	131	143	146	152	156	160
Величина вертикальной деформации корпуса, мм									
Vert, мм	171	200	205	217	230	231	236	238	241

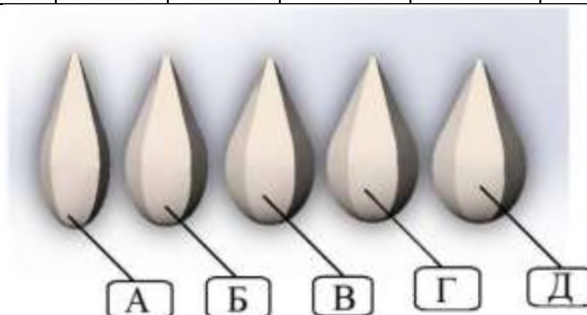


Рисунок 7. Геометрия тела опытного образца подводного робота при различных величинах давления в пневматических мускулах

Деформация корпуса раскладывается на три составляющие, а именно, горизонтальная и вертикальная составляющая в сечении миделя, а также продольная составляющая деформации вдоль оси тела робота.

Для реализации аппроксимации экспериментальных данных зависимости горизонтальной составляющей деформации воспользуемся методом наименьших квадратов и найдем уравнение квадратичной регрессии $Hor(P) = aP^2 + bP + c$.

Найдем коэффициенты a , b и c уравнения квадратичной регрессии из системы уравнений:

$$\begin{cases} a \sum P_i^2 + b \sum P_i + nc = \sum Hor_i \\ a \sum P_i^3 + b \sum P_i^2 + c \sum P_i = \sum P_i Hor_i \\ a \sum P_i^4 + b \sum P_i^3 + c \sum P_i^2 = \sum P_i^2 Hor_i \end{cases}$$

После подстановки рассчитанных значений в систему уравнений, получим систему уравнений:

$$\begin{cases} 133,76a + 30,40b + 9,00c = 1195,00 \\ 646,91a + 133,76b + 30,40c = 4444,00 \\ 3318,27a + 646,91b + 133,76c = 20129,28 \end{cases}$$

Аналогичным образом, как в представленных выше формулах были вычислены значения определителей $\Delta, \Delta_a, \Delta_b, \Delta_c$, а также коэффициентов уравнения квадратичной регрессии a, b и c . Искомое уравнение квадратичной регрессии имеет вид:

$$Hor(P) = -1,80P^2 + 24,42P + 77,05$$

Аналогичным образом найдем уравнение квадратичной регрессии $Vert(P) = aP^2 + bP + c$.

Найдем коэффициенты a , b и c уравнения квадратичной регрессии из системы уравнений:

$$\begin{cases} a \sum P_i^2 + b \sum P_i + nc = \sum Vert_i \\ a \sum P_i^3 + b \sum P_i^2 + c \sum P_i = \sum P_i Vert_i \\ a \sum P_i^4 + b \sum P_i^3 + c \sum P_i^2 = \sum P_i^2 Vert_i \end{cases}$$

После подстановки рассчитанных значений в систему уравнений, получим систему уравнений:

$$\begin{cases} 133,76a + 30,40b + 9,00c = 1969,00 \\ 646,91a + 133,76b + 30,40c = 7001,20 \\ 3318,27a + 646,91b + 133,76c = 31287,20 \end{cases}$$

Аналогичным образом, как в представленных выше формулах, были вычислены значения определителей $\Delta, \Delta_a, \Delta_b, \Delta_c$, а также коэффициентов уравнения квадратичной регрессии a, b и c . Искомое уравнение квадратичной регрессии имеет вид:

$$Vert(P) = -1,67P^2 + 21,77P + 170,09$$

На рисунках 8 и 9, соответственно, представлено сравнение полученных данных

горизонтальной составляющей деформации и вертикальной составляющей деформации с экспериментальными данными.

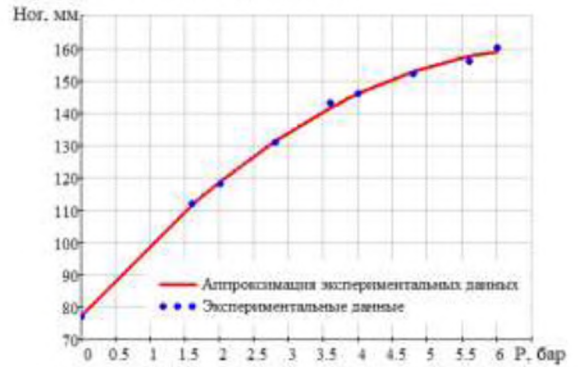


Рисунок 8. Горизонтальная составляющая деформации корпуса

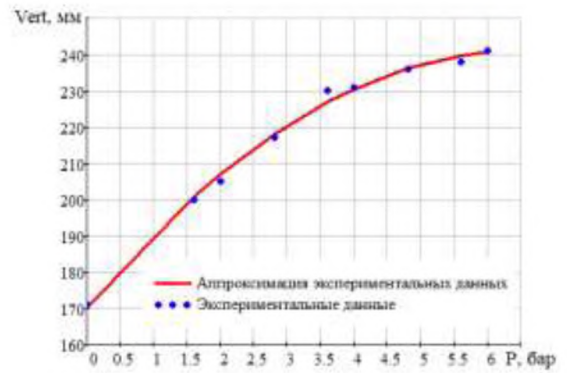


Рисунок 9. Вертикальная составляющая деформации корпуса

Средняя ошибка аппроксимации для горизонтальной деформации составила:

$$\bar{A} = \frac{1}{n} \sum \left| \frac{Hor_i - Hor(P_i)}{n} \right| \cdot 100\% = \frac{0,04}{9} \cdot 100\% \approx 0,50\%$$

Средняя ошибка аппроксимации для вертикальной деформации составила:

$$\bar{A} = \frac{1}{n} \sum \left| \frac{Vert_i - Vert(P_i)}{n} \right| \cdot 100\% = \frac{0,05}{9} \cdot 100\% \approx 0,53\%$$

5 Заключение

В результате работы были получены следующие результаты:

1. Разработан экспериментальный образец подводного робота с изменяемой геометрией тела;
2. Разработана система изменения геометрии корпуса робота на основе пневматических мускулов. Такая система позволит реализовать оптимальную геометрию тела в зависимости от определенной структуры потока;

3. Произведена количественная оценка деформаций корпуса робота в зависимости от величины подаваемого в пневматические мускулы давления. С помощью метода наименьших квадратов были выведены функциональные зависимости для горизонтальной и вертикальной составляющих деформации.

6 Благодарности

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (грант 1.7914.2017 /8.9, 0777-2017-000 4).

Список использованных источников

[1] Tohnhui L., Yanhui W., Zhu G., (2012). Analysis of hydrodynamic noise around acoustic modem on the AUV using Hybrid LES-Lighthill Method. *Advanced Material Research.*, ISSN:1662-8985, Vols 546-547, pp.176-181.
[2] Aymen M., Hedi K., Med S.A., Zied D., (2018). Impact of stern design on hydrodynamic grad of AUV's hull. *Indian Journal Of Geo Marine Sciences.*, Vol. 47(01) pp. 89-95.

[3] Cho KJ., Wood R. (2016) *Biomimetic Robots*. In: Siciliano B., Khatib O. (eds) *Springer Handbook of Robotics*. Springer, Cham; Print ISBN 978-3-319-32550-7.
[4] Bandyopadhyay R.. (2005). Trends in Biorobotic Autonomous Undersea Vehicles. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, V. 30, N. 1, p. 109-139.
[5] Marchese D., Cagdas D., (2014). Autonomous Soft Robotic Fish Capable of Escape Maneuvers Using Fluidic Elastomer Actuators, *SOFT Robot*. doi:10.1089/soro.2013.0009.
[6] Kumph J. M. (2000). *Maneuvering of a Robotic Pike*. Massachusetts Institute of Technology.
[7] Barrett D.S. (1988). *Propulsive efficiency of Robotuna*. PhD thesis, Massachusetts Institute of Technology
[8] Yoseph B.-C. (2003). *Biologically Inspired intelligent Robots*. *Technology & Engineering*, pp. 329
[9] Yu, J., Zhang, A., Jin, W., Chen, Q., Tian, Y., Liu, C., (2011). Development and experiments of the sea-wing underwater glider. *China Ocean Eng.*, 25(4):721-736. [doi: 10. 1007/s13344-011-0058-x]
[10] Gafurov, S., Salmina, V., Greshnyakov, P., Mukhametzyanov, A., Handroos, H. (2017) *Semi-natural test bench for buoyancy variation system of underwater robots investigations*. *Proceedings of the 24th International Congress on Sound and Vibration, ICSV 2017, London, UK*

**Galushko I.D.,
Salmina V.A.,
Makaryants G.M.**

Samara University
Moskovskoe Shosse, 34
Samara, Russian Federation
443086
neeva2804@gmail.com
salmina.va@yandex.ru
georgy.makaryants@gmail.com

DEVELOPMENT OF AN APPROACH TO THE MANAGEMENT OF THE STRUCTURE OF WALL-FLOWING

The development of a prototype of an underwater robot with a variable geometry of the body is a major complex task, including a whole series of tasks of a scientific, technical, engineering and applied nature, and the creation of new automatic systems for managing it. The creation of such a robot will ensure its high autonomy and maneuverability. In this paper, the development of a solid model of a biomimetic robot hybrid and AUV with a variable geometry of the hull is presented. Also presented is a basic pneumatic circuit integrated into the robot body, which drives the pneumatic muscles fixed to the ribs of the robot's robust body. The experimental part includes the investigation of the vertical and horizontal components of the deformation of the walls of the shell, depending on the pressure supplied by the pneumatic system to the pneumatic muscles.

Key words: *pneumatic muscle; underwater robotics; anisotropic body; pneumatic; variable geometry*

References

- [1] Tohngui L., Yanhui W., Zhu G., (2012). Analysis of hydrodynamic noise around acoustic modem on the AUV using Hybrid LES-Lighthill Method. Advanced Material Research., ISSN:1662-8985, Vols 546-547, pp.176-181.
- [2] Aymen M., Hedi K., Med S.A., Zied D., (2018). Impact of stern design on hydrodynamic grad of AUV's hull. Indian Journal Of Geo Marine Sciences., Vol. 47(01) pp. 89-95.
- [3] Cho K.J., Wood R. (2016) Biomimetic Robots. In: Siciliano B., Khatib O. (eds) Springer Handbook of Robotics. Springer, Cham; Print ISBN 978-3-319-32550-7.
- [4] Bandyopadhyay R.. (2005). Trends in Biorobotic Autonomous Undersea Vehicles. IEEE Journal of Oceanic Engineering, V. 30, N. 1, p. 109-139.
- [5] Marchese D., Cagdas D., (2014). Autonomous Soft Robotic Fish Capable of Escape Maneuvers Using Fluidic Elastomer Actuators, SOFT Robot. doi:10.1089/soro.2013.0009.
- [6] Kumph J. M. (2000). Maneuvering of a Robotic Pike. Massachusetts Institute of Technology.
- [7] Barrett D.S. (1988). Propulsive efficiency of Robotuna. PhD thesis, Massachusetts Institute of Technology
- [8] Yoseph B.-C. (2003). Biologically Inspired intelligent Robots. Technology & Engineering, pp. 329
- [9] Yu, J., Zhang, A., Jin, W., Chen, Q., Tian, Y., Liu, C., (2011). Development and experiments of the sea-wing underwater glider. China Ocean Eng., 25(4):721-736. [doi: 10. 1007/s13344-011-0058-x
- [10] Gafurov, S., Salmina, V., Greshnyakov, P., Mukhametzyanov, A., Handroos, H. (2017) Semi-natural test bench for buoyancy variation system of underwater robots investigations. Proceedings of the 24th International Congress on Sound and Vibration, ICSV 2017, London, UK.