

Раздел III. Вычислительные и информационно-управляющие системы

УДК 621.865.8

DOI 10.18522/2311-3103-2025-1-185-203

Д.А. Гриценко, И.Б. Аббасов

ОБЗОР ТЕНДЕНЦИЙ В РАЗРАБОТКЕ БИОМИМЕТИЧЕСКИХ ПОДВОДНЫХ АППАРАТОВ

Представлен обзор некоторых современных тенденций в разработке и создании биомиметических подводных аппаратов. Биомиметика как междисциплинарная область науки черпает вдохновение из природных форм, что позволяет разработчикам создать оригинальные решения для задач подводных исследований. Во введении отмечена актуальность задачи и преимущества биомиметических конструкций, приведены некоторые успешные примеры использования данных подводных объектов. Указана цель, задачи обзора, описаны методы сбора, анализа информации. Отмечены особенности данной междисциплинарной области разработок подводных аппаратов, которые конструируются с учётом не только технологичности, также используются знания из области биологии. Представлены конструкции биомиметических роботов рыб, материалы для этих подводных аппаратов с учётом обтекаемости. Описаны разновидности технологий создания автономных подводных аппаратов, их особенности движения и управления в водной среде: рыбоподобные движения, реактивная тяга. Подчеркнуты методы управления биороботами, указаны разработки на основе движения плавниками ската мантии. Отмечена важность применения глубокого обучения с подкреплением при моделировании управления подводного аппарата. Подробно представлены примеры разработки биомиметических подводных аппаратов на основе вычислительного анализа динамики жидкости, возникновение турбулентности при различных типах движения. Некоторые разработчики создали бионические дельфиноподобные роботы, объединив механические свойства и подводное планирование, что позволило значительно улучшить маневренность и скорость этих аппаратов. Рассмотрены некоторые примеры реализации метода бионического дизайна в области судостроения, авиации. Отмечены проблемы и перспективы развития биомиметических технологий применительно к разработкам подводных автономных биомиметических аппаратов. В заключение указаны основные результаты исследования и перспективы развития биомиметических технологий в морской инженерии.

Автономные беспилотные подводные аппараты; биомиметика; искусственные модели подводной фауны; беспилотные биомиметические подводные аппараты; рыбоподобные роботы; конструкция подводных биомиметических аппаратов; управление подводными аппаратами.

D.A. Gritsenko, I.B. Abbasov

A REVIEW OF TRENDS IN THE DEVELOPMENT OF BIOMIMETIC UNDERWATER VEHICLES

This paper presents an overview of some modern trends in the development and creation of biomimetic underwater vehicles. Biomimetics as an interdisciplinary field of science draws inspiration from natural forms, which allows developers to create original solutions for underwater research problems. The introduction notes the relevance of the problem and the advantages of biomimetic designs, and provides some successful examples of using these underwater objects. The purpose and objectives of the review are indicated, and the methods for collecting and analyzing information are described. The features of this interdisciplinary field of underwater vehicle development are noted, which are designed taking into account not only technology, but also using knowledge from the field of biology. The designs of biomimetic fish robots, materials for these underwater vehicles are presented, taking into account streamlining. The varieties of technologies for creating autonomous underwater vehicles, their features of movement and

control in the aquatic environment are described: fish-like movements, jet thrust. The methods of controlling biorobots are emphasized, developments based on the movement of the fins of the manta ray are indicated. The importance of using deep reinforcement learning in modeling the control of an underwater vehicle is noted. Examples of the development of biomimetic underwater vehicles based on computational analysis of fluid dynamics, the occurrence of turbulence in various types of motion are presented in detail. Some developers have created bionic dolphin-like robots by combining mechanical properties and underwater planning, which has significantly improved the maneuverability and speed of these devices. Some examples of the implementation of the bionic design method in the field of shipbuilding and aviation are considered. The problems and prospects for the development of biomimetic technologies in relation to the development of underwater autonomous biomimetic vehicles are noted. In conclusion, the main results of the study and the prospects for the development of biomimetic technologies in marine engineering are indicated.

Autonomous unmanned underwater vehicles; biomimetics; artificial models of underwater fauna; unmanned biomimetic underwater vehicles; fish-like robots; design of underwater biomimetic vehicles; control of underwater vehicles.

Введение. Для современных подводных исследований всё чаще разрабатываются роботы, которые подражают живым организмам в их внешнем виде, способах передвижения и принципах функционирования. Эти организмы, такие как насекомые, рептилии, рыбы и млекопитающие, в подавляющем своем большинстве являются результатом длительного процесса эволюции. В последнее десятилетие было создано множество интересных подводных беспилотных аппаратов, которые копируют внешний вид и методы передвижения морских существ.

В настоящее время существует пример биомиметического подводного аппарата, который используется в Военно-морских силах США. Этот аппарат называется Ghost Swimmer [1] (рис. 1, слева). Его название связано с важными с военной точки зрения характеристиками: он обладает более энергоэффективным и бесшумным движением по сравнению с традиционными винтовыми гребными системами. Кроме того, этот аппарат трудно отличить от настоящих обитателей подводной среды (от акулы), что обеспечивает ему большую скрытность и потенциальный радиус действия, зависящий от степени схожести с живым аналогом BUV (biomimetic underwater vehicle).

Следует подчеркнуть, что в этом обзоре представлены некоторые зарубежные и отечественные биомиметические автономные подводные аппараты. К сожалению, отечественные разработки в этой области значительно отстают от мировых тенденций, поэтому данный обзор может содействовать пониманию и оценке современных достижений. Обзор не претендует на всеохватывающий и включает лишь некоторые примеры перспективных направлений применения этих подводных аппаратов. При составлении данного обзора использовался метод обработки исходной информации, который включает в себя сбор, анализ, сравнение и синтез. В качестве исходных данных были взяты современные научные публикации, также электронные ресурсы, посвященные разработке морских биомиметических систем.

Биомиметические подводные аппараты. Можно отметить работу [2], в которой автор исследует новые конструкции BUV (biomimetic underwater vehicle), разработанные в рамках специальных проектов, основанные на опыте строительства пяти версий польских BUV, называемых CyberFish. Все версии CyberFish были построены в Краковском политехническом университете. 3-я и 5-я версии, наглядно проиллюстрированные (рис. 1, справа и рис. 2), были построены в сотрудничестве с Польской военно-морской академией.

В целом CyberFish состоит из четырех жестких сегментов, соединенных вращательными кинематическими парами. Первый самый большой сегмент представляет собой искусственную голову с боковыми плавниками, а следующие три сегмента создают подвижный искусственный хвост рыбы.

На рис. 2 показано силиконовое покрытие CyberFish, подводный аппарат был разработан для максимально близкой имитации пресноводной карповой рыбы. Более подробная информация о конструкции и принципах работы CyberFish приведена в работе [3]. Искусственное покрытие имитирует рыбью чешую и позволяет CyberFish увеличить сходство с рыбой карп, обитающей во внутренних водах. Транспортное средство, «носящее» такое покрытие и движущееся волнообразно, едва заметно для реальных обитателей подводной среды [4].



Рис. 1. Роботы GhostSwimmer [1] и CyberFish ver. 3 в бассейне [2]

CyberFish является хорошим демонстратором биомиметической технологии, показывающим возможные преимущества BUV в области подводной разведки, особенно в области секретных операций. Но недостатком такой презентации технологий является отсутствие возможности тестирования и полноценной работы большинства подводных датчиков, например, сонара, гидрофона и т.д. Этот недостаток в основном обусловлен малыми размерами CyberFish. Кроме того, бортовая система управления имеет недостаточную вычислительную мощность для высокоуровневых алгоритмов управления, реализующих автономное поведение.



Рис. 2. Силиконовое покрытие CyberFish ver. 5 [4]

Положительный опыт и результаты, достигнутые в процессе проектирования, создания и, наконец, тестирования CyberFish были одной из главных причин запуска польского проекта, а затем и международного проекта.

Далее отметим некоторые отечественные разработки в данной области. В обзорной статье [5] отмечается, что биомиметика, как междисциплинарное направление разработок формируется на базе системного обобщения достижений из областей: биологии, математики, информатики, электроники, механики, материаловедения, робототехники с применением принципов биологической имитации.

В статье [6] описана конструкция опытного образца робота-рыбы, состоящего из корпуса, хвостовой части и боковых плавников. При этом робот плавает на заданной глубине, может поворачиваться, осуществлять динамическое погружение и всплытие.

Разработки по созданию образцов малых автономных подводных аппаратов, основанных на бионических принципах движения, описываются в обзорной работе [7]. Они могут быть использованы для мониторинга, разведки, боевого охранения надводных и подводных сооружений, также описываются их конструкции, методы движения и критерии экономичного энергопотребления.

Статья [8] посвящена результатам экспериментального и численного моделирования движения рыбоподобного подводного робота. Данная модель позволяет исследовать биоморфное плавание робота с различными параметрами движения, и расчетная схема позволяет получать данные, подтвержденные проведенными экспериментами.

В работе [9], посвященной обзору и определению проблемных вопросов, связанных с конструированием подводных аппаратов, авторы рассматривают основные принципы биомиметической конструкции, такие как: адаптация формы, структуры и поверхности тела подводных существ для создания корпусов технических объектов с оптимальной гидродинамикой, а также имитацию и механизмы передвижения биологических организмов, взмах плавников, движения хвоста, для разработки эффективных систем привода и маневренности морских автономных аппаратов. Отдельно отмечены скаты, которые «обладают уникальной техникой плавания, используя взмахи грудными плавниками, что обеспечивает им эффективность, сравнимую с другими рыбами. Их обтекаемые формы и кожное покрытие с низким сопротивлением к скольжению способствуют этим преимуществам. Уникальное движение плавников позволяет им перемещаться с меньшими затратами энергии». Далее в работе обсуждаются зарядные устройства для подводных аппаратов и различные методы подводной зарядки. Также обсуждаются ключевые аспекты управления подводными биомиметическими аппаратами: контроль глубины, гидролокаторы, GPS и инерциальные навигационные системы. Приводятся примеры различных моделей биомиметических аппаратов, похожих на рыб, скатов, медуз, черепах, осьминогов и ракообразных [10, 11].

Обзор типов движения автономных биомиметических подводных аппаратов. В работе Hasan K. et al [12] автономные подводные аппараты (autonomous underwater vehicle – AUV) олицетворяют революционный шаг в подводных исследованиях, легко принимая на себя задачи, которые когда-то были исключительно для пилотируемых аппаратов. Их работа в рамках совместных миссий открыла новую эпоху сложных приложений в подводных областях. Основная цель работы [12] – изучить последние технологические достижения в области AUV и их роль в навигации в сложных подводных средах. Этот обзор синтезирует технологические достижения, освещая последние разработки в моделях биомиметики, в передовых системах управления, адаптивных навигационных алгоритмах и основных массивах датчиков, имеющих решающее значение для картирования дна океана. Эта работа предоставляет действенные идеи и направления для продвижения области подводной робототехники.

Для прогнозирования динамических характеристик рыбоподобного AUV, который разрабатывается в Национальном университете Тайваня, был реализован практический метод моделирования волнообразной локомоции гибкого тонкого тела [13]. Когда гибкое тонкое тело, разделенное на множество сегментов, совершает колебания, волна проходит от носа к хвосту. Учитываются силы реакции, обусловленные изменением импульса, трением, а также сопротивление поперечного потока, действующие на каждый сегмент. Уравнения движения, описываемые координатами тела, получаются суммированием продольной силы, поперечной силы и момента рысканья, действующих на все сегменты. При численном моделировании применяется метод цифровой фильтрации, чтобы избежать дрейфа в движениях раскачивания, рыскания, и получить устойчивые решения. На основе результатов серии имитационных расчетов в работе [14] показаны и обсуждены динамические характеристики испытательного стенда BAUV.

По мнению авторов статьи [15] биомиметические подводные роботы привлекают значительное внимание исследователей во всем мире благодаря их более тихой работе, более высокой эффективности движителей и большей маневренности по сравнению с обычными подводными аппаратами, оснащенными осевыми движителями. В этой научной работе представляется обзор текущих исследований в данной области. Сначала рассматривается состояние разработки биомиметических подводных роботов с корпусом и хвостовым плавником, средним и парным плавником, а также их гибридных движителей. Затем описываются методы управления движением, используемые в биомиметических подводных роботах, включая управление плаванием с открытым контуром и типичные стратегии управления с закрытым контуром. В частности, подробно описаны последние исследования подводных роботов серии RobCutt, которые отображены на рис. 3. На этой основе обобщаются некоторые критические вопросы и направления дальнейшей работы. Высказывается предположение, что биомиметические подводные роботы будут иметь отличные перспективы в исследовании подводной среды и использовании ресурсов.

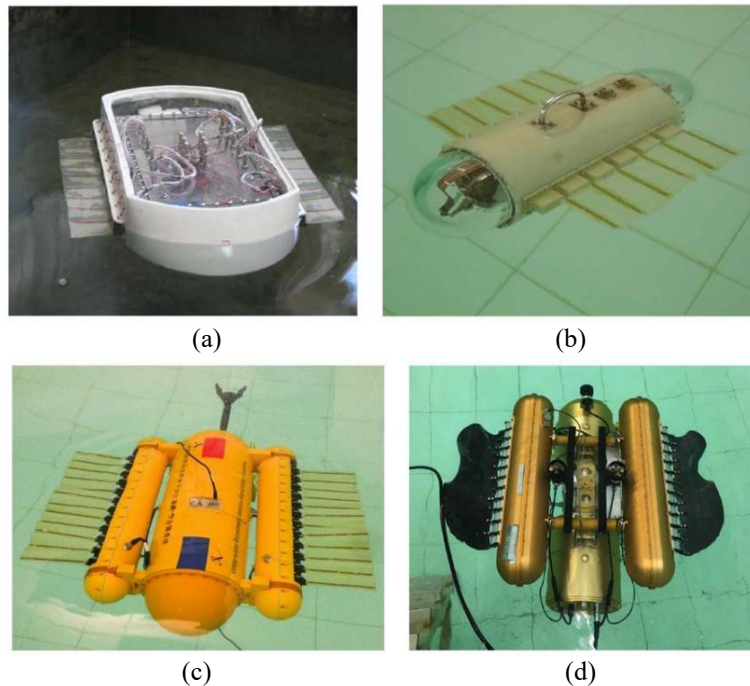


Рис. 3. Подводные роботы: (a) RobCutt-I; (b) RobCutt-II; (c) RobCutt-III; (d) RobCutt-IV [15]

В обзорной статье [16, 17] анализируется текущее состояние исследований по устойчивости подводных аппаратов на основе различных критериев. Соответствующая литература в базах данных China National Knowledge Infrastructure (CNKI) и Web of Science (WoS) была изучена с помощью CiteSpace и VOSviewer. Создан визуальный атлас исследователей, учреждений и ключевых слов. Кроме того, подробно представлены китайские и международные исследования в трех областях, в том числе стилистика и структурный дизайн, управление движением и оптимизация систем, а также обсуждаются основные методы исследования. Также в работе описаны новые тенденции и выделены существующие проблемы в данной области.

В работе [18] представлен мягкий робот, воспроизводящий способность головоногих моллюсков передвигаться в водной среде с помощью импульсной реактивной тяги. В этом режиме движения, прерывистая струя жидкости выбрасывается через сопло и сворачивается в вихревое кольцо. Было доказано, что возникновение вихревого кольца в плоскости выхода из сопла обеспечивает дополнительную тягу по сравнению с тягой, создаваемой непрерывной струей. Ряд авторов проводили эксперименты с устройствами для создания вихревой тяги в виде поршнево-цилиндрических камер и колеблющихся диафрагм. В данном случае основное внимание уделяется созданию точной биомиметики структурных и функциональных характеристик осьминога *Octopus vulgaris*. Схематическое изображение последовательности пульсаций с внешней стороны мантии осьминога отображено на рисунке 4. Мантия расширяется, и вода всасывается через клапаны и, в незначительной степени, через сифон; мантия сжимается, и вода изгоняется через сифон, образуя структурированное вихревое кольцо [18].

Для этого общая форма робота-плавунца достигается путем отливки силиконового слепка настоящего осьминога, что позволяет получить достоверную копию как внешней, так и внутренней камеры мантии осьминога. Цикл активации основан на сжатии/расслаблении эластичной камеры с помощью троса, который прогоняет жидкость через сифонообразную насадку и в конечном итоге обеспечивает необходимую тягу для

приведения робота в движение. Представленный здесь прототип демонстрирует пригодность вихревых движителей для создания мягких беспилотных подводных аппаратов.

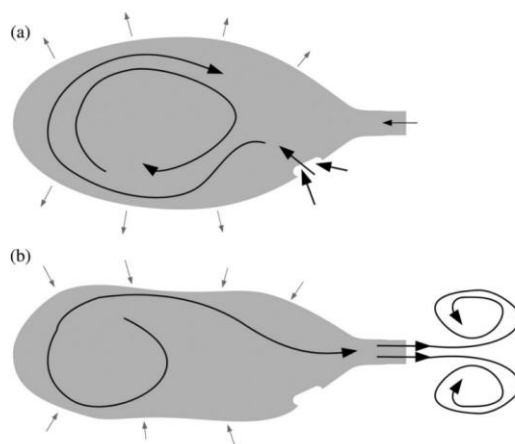


Рис. 4. Схематическое изображение последовательности пульсаций с внешней стороны мантии осьминога [18]

Проектирование рыбоподобного биоморфного движителя. Из отечественных исследований можно отметить также работу [19]. В ней одним из ключевых направлений в области робототехники обозначен поиск новаторских решений для создания биоморфных роботов. В статье рассматривается проектирование приводного механизма для подводного робота, выполненного в форме рыбы, основанного на принципах мягкой робототехники. Биомиметический робот сконструирован с использованием гибкого корпуса и движущегося хвоста, управление которым осуществляется с помощью оптимизированного по скорости двигателя постоянного тока, а также сервомотора для задания направления движения. Использование двигателя постоянного тока для приведения робота в движение уменьшает потери энергии по сравнению с другими колебательными устройствами, которые обычно управляются одним или несколькими серводвигателями.

На рис. 5–7 представлена компоновка роботизированной рыбы. Большинство частей корпуса при прототипировании выполнены из пластика полиэтилентерефталатгликоль (ПЭТГ) с применением аддитивных технологий. В ходе проектирования системы были разработаны два различных прототипа хвостов [19].

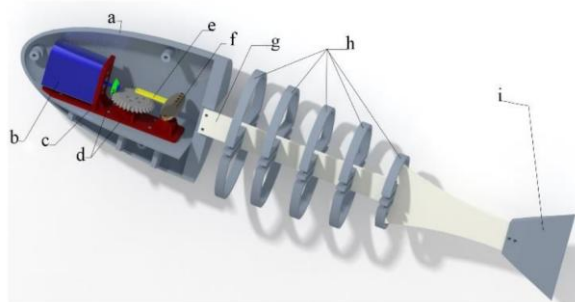


Рис. 5. Прототип с применением несущей конструкции для хвоста [19]

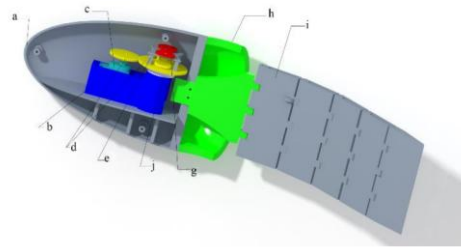


Рис. 6. Прототип с применением многосегментного хвоста [19]



Рис. 7. Собранные прототипы [19]

Маневрирование и управление биомиметическим автономным подводным аппаратом. В работе [20] в качестве нового биологического подводного транспортного средства был разработан роботизированный скат манта (RoMan-II, характеристики отображены ниже на рис. 8 и в табл. 1) для потенциального морского применения. Скат манта может выполнять разнообразные движения в воде, манипулируя двумя широкими плавниками. Эти движения были реализованы в разработанном роботе-рыбе, включая плавание с помощью хлопающих плавников, поворот с помощью модуляции фазовых соотношений плавников и онлайн-переход между различными моделями движения. Движения осуществляются с помощью модели искусственных центральных генераторов паттернов, построенных на основе связанных нелинейных осцилляторов. Предполагается, что метод управления, продемонстрированный на роботе-манта, может стать основой для решения проблем управления локомоцией в других типах многофункциональных роботов-рыб или более общих роботов с ритмичной моделью движения.

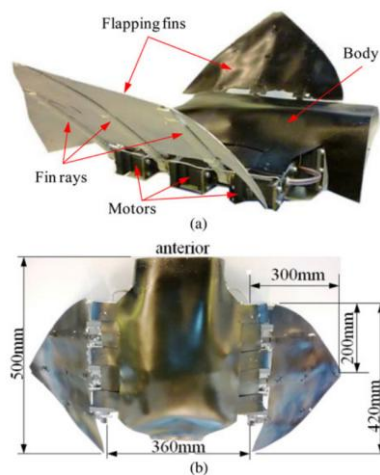


Рис. 8. Роботизированный скат манта RoMan-II: (а) внешний вид и (б) основные размеры (вид сверху) [20]

Таблица 1

Характеристики RoMan-II [Chunlin, 2012]

Масса	Приблизительно 7,3 кг
Размеры движителя	500 мм (Д) x 105 мм (В) x 960 мм (Ш)
Привод	Шесть бесщеточных серводвигателей постоянного тока
Контроллер	PIC18F2431 и PIC18F4520
Источник питания	7,2 В постоянного тока, два комплекта Ni-MH аккумуляторов емкостью 4500 мАч
Скорость плавания	0,4 м/с, 0,8 об/с (макс.)
Время работы	Примерно 6 часов для плавания, примерно 9 часов для планирования

В работе [21] представлен подход к маневрированию и управлению биомиметическим автономным подводным аппаратом BAUV (biomimetic autonomous underwater vehicle). Аппарат плывет вперед, колеблясь корпусом и хвостовым плавником. Он поворачивает, изгибая свое тело и хвостовой плавник в направлении предполагаемого движения. Функция body-spline задается набором параметров. Генетические алгоритмы используются для поиска значений параметров путем оценки функции приспособленности в течение нескольких пробных плаваний в аквариуме. Подходящая функция определяется как отношение кинетической энергии движения вперед к требуемой мощности двигателей суставов.

Предложен закон управления, который использует частоту колебаний для управления скоростью движения вперед и применяет параметр смещения тела-сплайна для управления скоростью рысканья. Скользящие средние скорости плавания и углы поворота используются в качестве сигналов обратной связи для управления скоростью движения и углом поворота BAUV. Эффективность алгоритма управления подтверждена экспериментально.

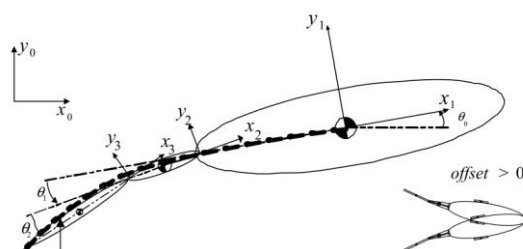


Рис. 9. Определение координат BUUV и body-spline [21]

Так как упомянутые ранее автономные подводные аппараты AUV – это подводные роботы, способные выполнять определенные задачи без помощи человека-оператора, то одним из ключевых навыков каждого AUV является способность избегать столкновений. Для этого необходимы соответствующие устройства и программное обеспечение, способные обнаруживать препятствия и принимать правильные решения с точки зрения как задачи, так и безопасности аппарата. В статье [22] представлена нейронная система предотвращения столкновений, разработанная для биомиметического автономного подводного аппарата BAUV. Задача нейронной сети – принимать решения о маневрах транспортного средства в горизонтальной плоскости, но только в непосредственной близости от препятствий. Она реализована в виде эволюционной искусственной нейронной сети, разработанной с помощью нейроэволюционного метода. В статье описывается работа и конструкция BUUV, а также роль нейронной системы в управлении всей системой.

Управление биомиметическим подводным аппаратом с помощью глубокого обучения с подкреплением. В статье [23] рассматривается проблема управления подводным слежением за целью для биомиметического подводного аппарата BAUV. Поскольку построить эффективную математическую модель BAUV сложно из-за неопределенности гидродинамики, управление сопровождением цели достигается с помощью глубокого обучения с подкреплением. Описаны состояния системы и функция

вознаграждения для управления сопровождением подводной цели. В рамках концепции обучения с подкреплением, основанной на акторной критике, предложен глубокий детерминированный градиентный алгоритм с контроллером наблюдения.

Представлены приемы обучения, включая приоритетное повторение опыта, обучение сети акторов с косвенным наблюдением, обновление сети целей с различными периодами и расширение пространства исследования за счет применения случайного шума. Проведено сравнительное моделирование, демонстрирующее эффективность приемов обучения. Наконец, предложенный алгоритм подкрепляющего обучения с критической оценкой действий и контроллером наблюдения применяется на физическом BAUV. Для проверки эффективности и надежности предложенного метода проводятся эксперименты в бассейне по отслеживанию подводных объектов на BAUV в различных сценариях.

В обзорной работе [24] рассматриваются биомиметические подводные роботы, созданные с использованием интеллектуальных приводов, например, сплава с памятью формы (shape-memory alloy – SMA), ионного полимерного металлокомпозиата (ionic polymer-metal composite or compound – IPMC), цирконата-титаната свинца (PZT, где P – аббревиатура элемента свинца Pb, Z – аббревиатура элемента циркония Zr, T – аббревиатура элемента титана Ti) или гибридного привода SMA и IPMC. Также рассмотрено влияние подводной среды, поскольку интеллектуальные приводы часто подвержены влиянию внешней среды. Характеристики интеллектуальных приводов описываются в зависимости от условий их работы и типов движения.

Подводные роботы классифицируются на основе различных режимов плавания. Классификация была расширена до нерыбных существ, основываясь на их режимах плавания. Тенденции развития биомиметических подводных роботов были проанализированы на основе скорости робота. По скорости на длину тела, роботы, использующие SMA в качестве привода, быстрее роботов, использующих IPMC, при одинаковой длине и весе. Наконец, роботы (с интеллектуальными приводами или двигателем) сравнивались с подводными животными по скорости и различным режимам плавания. Этот обзор может помочь обозначить ориентиры для разработки будущих биомиметических подводных роботов.

Обзор вычислительного анализа динамики жидкости биомиметических подводных аппаратов. В статье [25] биомиметика, черпающая вдохновение из природы, стала ключевым подходом в разработке подводных транспортных средств. Интеграция этого подхода с вычислительной гидродинамикой (computational fluid dynamics – CFD) еще больше продвинула исследования в этой области. Вычислительная гидродинамика способствует глубокому пониманию и решению сложных гидродинамических задач, что улучшает скорость, надежность и маневренность подводных объектов и способствует снижению их сопротивления и шума. Объединение этих подходов открывает новые возможности для исследований в естественных науках и инженерии. Основное внимание статьи уделяется применению CFD в биомиметике, включая аспекты движения, уменьшения сопротивления и снижения шума, а также рассматриваются существующие проблемы и перспективы развития в этой области.

В работе [25] рассматривается применение биомиметического движения в автономных подводных аппаратах AUV, которое стало популярным благодаря его многофункциональности и широкому спектру применения, включая глубоководную разведку и обслуживание подводной инфраструктуры. Традиционные методы движения AUV с использованием винтов создают проблемы, такие как высокое энергопотребление, повышенное сопротивление и шум. Поэтому исследователи изучают маневры водных существ для разработки более эффективных AUV, которые используют волнообразные движения тела и хвоста, что улучшает их энергоэффективность и маневренность.

Также обсуждается техника движения с хвостовым плавником, которая обеспечивает высокую эффективность, маневренность и устойчивость в сложных условиях. Исследователи провели численное моделирование, чтобы понять, как различные параметры модели (частота, амплитуда, соотношение сторон) влияют на характеристики движения и эффективность. Также представлены схемы моделей махового гидрокрыла и краткое резюме различных гидрокрыльев, описывающих их конструкции и методы моделирования.

В работе [26] была разработана модель взаимодействия жидкостей и структур FSI (fluid structure interaction), которая позволяет имитировать поведение рыбы при плавании, используя коммерческое программное обеспечение CFD. Эта модель помогает в создании численных симуляций для биомиметических подводных аппаратов. Chung и его коллеги [27] применили FSI для анализа движения плавников рыб, а Wright и коллеги [28] изучили влияние материалов хвостовых плавников на гидродинамические характеристики. В работе [28] использовали CFD для моделирования биомиметических автономных подводных аппаратов AUV, а в работе [29] авторы исследовали гидродинамические характеристики тунца для улучшения эффективного движения. Они также обратили внимание на поведение стайных рыб, анализируя их гидродинамические характеристики в различных режимах. Эти исследования подчеркивают важность комплексного подхода к пониманию и оптимизации гидродинамических свойств подводных транспортных средств.

В исследовательской работе [30] так же, отмечается, что скаты используют уникальную технику плавания, взмахивая грудными плавниками, что обеспечивает им высокую маневренность и эффективность. Их обтекаемая форма и кожа с низким сопротивлением способствуют этому. Исследователи используют вычислительную гидродинамику для моделирования этих биологических характеристик, чтобы понять динамику батоидов.

Что касается группового плавательного поведения и его гидродинамических эффектов, Gao и другие [31] провели углубленное исследование коллективного плавательного поведения батоидов и тунцов, что позволило получить новое представление о гидродинамических эффектах индивидуального и скоординированного плавательного поведения. Исследуемая модель ската манта изображена на рис. 10, на рис. 11 представлена структура волнения, а на рис. 12 – распределение давления на тело ската.

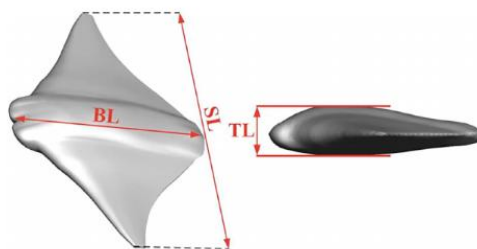


Рис. 10. Модель манты [31]

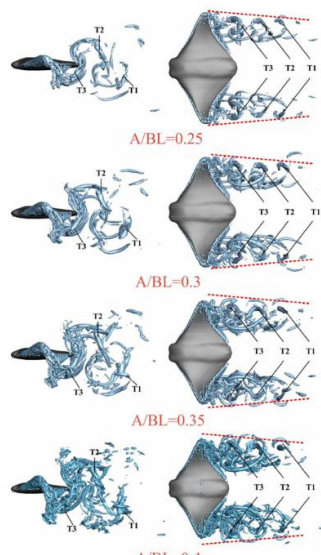


Рис. 11. Трехмерная структура следа при разных амплитудах колебания плавников манты [31]

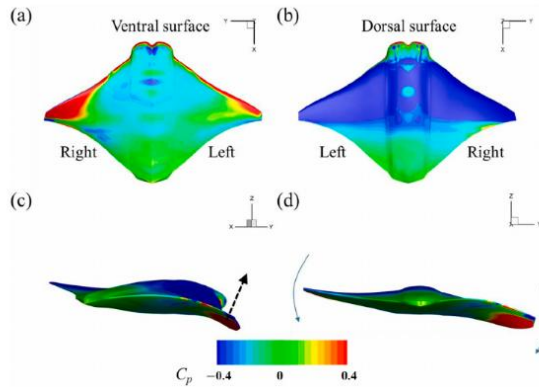


Рис. 12. Распределение давления на теле ската: а) распределение давления на вентральной поверхности; б) распределение давления на дорсальной поверхности; в) левый и правый плавники складываются в горизонтальной плоскости; г) компонент, который формирует крутящий момент [31]

Кроме того, Menzer и другие в работе [32] и Safari и его коллеги в [33] расширили исследование сложных нестационарных вихревых структур, возникающих в результате машущих движений батондов, с помощью численного моделирования.

Дельфины являются замечательными пловцами благодаря своей высокой эффективности и уникальному дорсовентральному механизму движения, который также используется другими водными млекопитающими. Исследователи стремятся понять и имитировать этот механизм, так как это может привести к созданию высокоэффективных подводных аппаратов. Важную роль в эффективности плавания дельфинов играют координация их тела с грудными, спинными и хвостовыми плавниками, что придаёт им ловкость и силу.

Недавние исследования, вдохновленные дельфинами, добились успехов в моделировании их движений. Например, в работе [34] разработали точную модель маневренности дельфина-робота, а в работе [35] улучшили управление роботом, введя модель колебаний грудного плавника с эллиптической траекторией. Ву и его команда [36–38] создали бионических дельфиноподобных роботов, объединив механические и подводные планеры, что позволило значительно улучшить их маневренность и скорость. Эти разработки демонстрируют возможности эффективного дизайна подводных роботов на основе характеристик движения дельфинов, что отображено на рис. 13, 14.

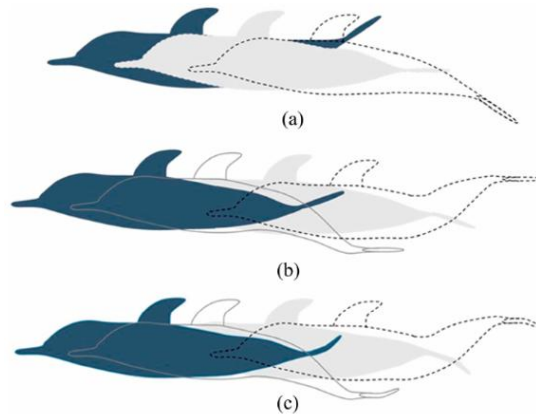


Рис. 13. Позы трех режимов движения дельфинов: а) одноступенчатая двигательная установка; б) двухступенчатая двигательная установка в) многоступенчатая тяга [36]

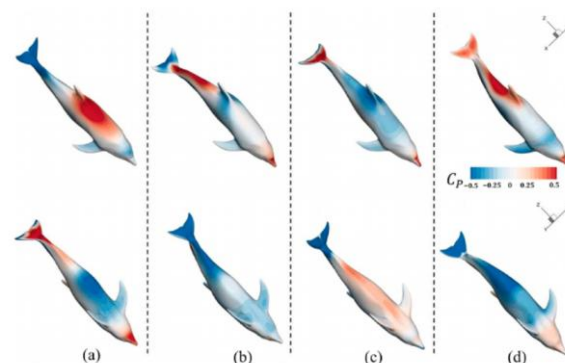


Рис. 14. Поверхностный контур коэффициента давления на колеблющемся теле дельфина [37]

Дельфины и скаты не единственные примеры, на которые ориентируются создатели биомиметических подводных аппаратов. Эффективность подводного движения морских организмов, таких как кальмары, значительно повышается благодаря их обтекаемым формам и уникальным методам передвижения. Кальмары используют реактивное движение, которое активируется для уклонения от хищников, обеспечивая высокую скорость и маневренность. Эта реактивная система, в сочетании с гидродинамическими характеристиками их тела, минимизирует сопротивление и улучшает эффективность плавания [39]. Кальмары могут ускоряться и ориентироваться в сложных условиях глубокого океана, что вызывает научный интерес к изучению их движений. В подводной мягкой робототехнике принципы реактивного движения кальмаров рассматриваются как инновация, способная улучшить конструкции роботов. Исследования показывают, что увеличение диаметра сопла реактивного движителя может значительно повысить его эффективность, что важно для оптимизации таких систем в подводных устройствах [40, 41].

Дальнейшие исследования привели к созданию улучшенной модели кальмара, которая требует минимальной тяги во время ускорения, что полезно для проектирования эффективных подводных двигательных систем. Использование большего диаметра сопла, меньших углов атаки и отсутствия плавников может повысить эффективность движения кальмара на 80% [42].

В работе [43] была разработана 2D-система, имитирующая плавание кальмара, которая показала, что более высокие числа Рейнольдса обеспечивают большую движущую силу и эффективность благодаря вихревым процессам. В более турбулентной среде увеличение числа Рейнольдса или уменьшение размера сопла ускоряет формирование неустойчивостей.

Также была создана 3D-модель реактивного движения с гибким корпусом и управляющим соплом, демонстрирующая, что изогнутые сопла эффективно управляют вектором тяги, в то время как вязкое трение зависит от числа Рейнольдса. Численный анализ показал, как скорость струи влияет на образование вихревых колец и производительность, что дает полезные данные для проектирования биомиметических подводных роботов.

Биомиметические технологии снижения сопротивления активно применяются в проектировании подводных аппаратов для уменьшения воздействий сил сопротивления, которые могут снижать скорость, увеличивать потребление энергии и влиять на устойчивость. Эти технологии имитируют формы и механизмы водных существ, таких как кожа акул и движения рыб, что ведет к улучшению навигационной эффективности.

Некоторые исследования достигли значительного снижения сопротивления, например, в исследовании [44] авторы смогли уменьшить сопротивление на 25% при с помощью модели кальмара. Разработанные методы, вдохновленные морскими существами, включая поверхность на основе рыбы-собаки и конструкции с конусообразными выступами, также показали обещающие результаты в снижении сопротивления и улучшении адгезии.

Оценка гидродинамических характеристик бионических форм. В работе [45] отмечается, что бионический дизайн, основанный на формах тел и отдельных элементах летающих и водоплавающих животных, нашел применение в авиации и судостроении, начиная от малых дронов и заканчивая супертяжелыми транспортными средствами. Представлен краткий обзор наиболее интересных технических решений, а также проанализированы принципы высокой эффективности плавания и полета в природе. С использованием метода конечных элементов был проведен сравнительный анализ гидромеханических параметров различных видов рыб и рассчитаны их аэродинамические характеристики. Также предложены модификации существующих аэродинамических профилей, которые могут способствовать улучшению их обтекаемости [45].

Как пример успешного использования биомиметического дизайна в авиации приводится транспортный самолет Beluga фирмы Airbus (рис. 15,а), форма корпуса которого была рассчитана на основе изучения гидродинамических свойств тела кита белухи (рис. 15,б). Китовидная форма была использована и в дизайне подводного исследовательского дрона EchoVoyager фирмы Boeing (рис. 16).



Рис. 15. Самолет Beluga (а) и его прототип кит белуха (б) [45]



Рис. 16. Подводный дрон EchoVoyager фирмы Boeing [45]

В работе [46] отмечается, что 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. К таким задачам относят задачу возникновения пульсаций давления и скорости, распределённых по поверхности объекта, а также шума и вибраций, вызванных этими пульсациями.

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. В работе [46] представлена разработка испытательного стенда для тестирования основных элементов системы управления автономного необитаемого подводного аппарата с изменяемой геометрией тела, где в виде отдельных модулей размещены подсистема переменной плавучести, подсистема изменения углов атаки, крена и тангажа, а также подсистема изменения геометрии на основе пневматических мускулов.

Проблемы и перспективы в области биомиметических технологий. Коммерческая жизнеспособность технологий, включая расходы на исследования и разработки, производство и обслуживание, требует детального анализа. Потенциальные рынки, такие как оборонные задачи и океанографические исследования, открывают разнообразные возможности для их применения.

Технология биомиметического движения в проектировании подводных транспортных средств основывается на уникальных двигательных системах морских существ, таких как рыбы и дельфины. Однако расчет гидродинамики сталкивается с трудностями при точном моделировании сложных процессов, таких как динамическое движение и ритмические колебания, что требует высокой вычислительной точности и значительных ресурсов.

Кроме того, сложные механические конструкции и системы управления необходимы для воспроизведения природных движений, что может сделать их менее эффективными при изменении условий. Несмотря на сложности, достижения в вычислительных технологиях, в материаловедении, а также в интеграции искусственного интеллекта, они открывают новые перспективы для улучшения биомиметических систем. Сотрудничество между различными дисциплинами, такими как биология и робототехника, также важна для успешной разработки этих технологий.

Будущее биомиметического движения требует инновационных решений и внимания к устойчивости, что может привести к снижению энергопотребления и шумового загрязнения. В экономическом контексте данная область находится на этапе активного развития, предлагая экологически чистую альтернативу традиционным методам.

В области биомиметического снижения сопротивления и шума подводных транспортных средств исследователи часто сосредотачиваются на особенностях отдельных морских существ, таких как акулы. Несмотря на то, что эти аспекты часто изучаются отдельно, между ними существует связь.

Основная проблема заключается в недостаточном понимании природных характеристик и в том, что результаты моделирования не всегда совпадают с наблюдениями из-за сложности факторов, таких как граничные условия жидкости и физиологические свойства. Также точность моделирования гидродинамики зависит от выбора модели турбулентности, что может приводить к неточностям в прогнозах. Высокие вычислительные затраты и время, необходимые для создания сложных 3D-моделей, замедляют процесс проектирования и оптимизации. Кроме того, существующие модели часто фокусируются на отдельных аспектах, что затрудняет эффективное решение задач, связанных с шумом, поскольку подводные транспортные средства создают различные типы шума.

Несмотря на текущие трудности, применение CFD в биомиметическом снижении сопротивления и шума имеет большие перспективы. Ожидается, что дальнейшее развитие методологий CFD позволит лучше моделировать сложные взаимодействия и приближаться к реальным условиям, что повысит точность и эффективность подводных транспортных средств.

Использование искусственного интеллекта и машинного обучения может дать ощутимый толчок развитию области, улучшая функции снижения сопротивления и шума с помощью алгоритмов на основе больших данных. Необходимы также обширные экспериментальные исследования для проверки и уточнения вычислительных моделей.

Целостный подход к оптимизации дизайна, объединяющий различные дисциплины, позволит повысить производительность подводных аппаратов. В целом, несмотря на существующие проблемы, область вычислительной гидродинамики в биомиметическом дизайне вскоре может достичь значительных успехов, что приведет к более эффективным и инновационным морским системам.

Заключение. В данной работе был представлен краткий обзор некоторых тенденций в области разработки биомиметических подводных аппаратов. Была отмечена актуальность задачи, указаны преимущества биомиметических конструкций над существующими механическими аналогами. В зависимости от типа движения были описаны рыбоподобные аппараты, также головоногие, использующие реактивную тягу. Были анализированы движения этих беспилотных аппаратов с точки зрения вычислительной гидродинамики, с учетом турбулентности. Рассмотрены примеры бионического дизайна в судостроении, выделены проблемы и перспективы развития биомиметических технологий. Можно отметить, что в перспективе биомиметика, исследующая морфологию и функции природных организмов, будет всё активнее использоваться создания автономных беспилотных подводных аппаратов.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Navy develops “Ghost Swimmer” drone that looks like a shark. Seriously. — <https://www.csmonitor.com/USA/Military/2014/1216/Navy-develops-GhostSwimmer-drone-that-looks-like-a-shark.-Seriously> (дата обращения: 24.10.2024).
2. Szymak P. Research on biomimetic underwater vehicles undertaken at Institute of Electrical Engineering and Automatics // *Maritime Technical Journal*. — 2016. — Vol. 206 (3). — P. 107-119. — DOI: 10.5604/0860889X.1224752.
3. Malec M., Morawski M., Szymak P., Trzmiel A. Analysis of Parameters of Traveling Wave Impact on the Speed of Biomimetic Underwater Vehicle // *Solid State Phenomena*. — 2014. — Vol. 210. — P. 273-279.
4. Szymak P., Praczyk T., Naus K., Szturomski B., Malec M., Morawski M. Research on biomimetic underwater vehicles for underwater ISR // *Ground/Air Multisensor Interoperability, Integration, and Networking for Persistent ISR VII*. — SPIE, 2016. — Vol. 9831. — P. 126-139. — DOI: 10.1117/12.2225587.
5. Бочаров А.Ю. Современные тенденции в развитии миниатюрных подводных аппаратов и роботов за рубежом // *Подводные исследования и робототехника*. — 2006. — № 2. — С. 36-52.
6. Яцун С.Ф., Лушников Б.В., Казарян К.Г., Ворочаева Л.Ю., Ворочаев А.В. Конструктивные особенности бионического робота-рыбы // *Известия Юго-Западного государственного университета. Серия Техника и технологии*. — 2017. — № 2 (23). — С. 94-102.
7. Яцун С.Ф., Королёв В.И., Бондырев В.Е., Лушников Б.В. Развитие малых и средних автономных необитаемых подводных аппаратов на основе бионических (рыбоподобных) принципов движения для решения задач подразделений специального назначения ВМФ РФ // *Известия ЮФУ. Технические науки*. — 2019. — № 1 (203). — С. 98-109. — DOI: 10.23683/2311-3103-2019-1-98-109.
8. Щур Н.А., Митин И.В., Коротаев Р.А., Миронов В.И., Казанцев В.Б. Экспериментальное исследование и численное моделирование гидродинамики рыбоподобного подводного робота // *Робототехника и техническая кибернетика*. — 2023. — Т. 11, № 1. — С. 40-44. — DOI: 10.31776/RTCJ.11105.
9. Аббасов И.Б., Тихомиров С.А. Обзор некоторых современных автономных биомиметических подводных аппаратов // *Cifra. Машиностроение*. — № 3 (4). — DOI: <https://doi.org/10.60797/ENGIN.2024.4.1>.
10. Ren K., Yu J. Research status of bionic amphibious robots: A review // *Ocean Engineering*. — 2021. — Vol. 227. — DOI: 10.1016/j.oceaneng.2021.108862.
11. He Y., Xie Y., Pan G. [et al.]. Depth and Heading Control of a Manta Robot Based on S-Plane Control // *Journal of Marine Science and Engineering*. — 2022. — Vol. 10. — P. 1698. — DOI: 10.3390/jmse10111698.
12. Hasan K. et al. Oceanic Challenges to Technological Solutions: A Review of Autonomous Underwater Vehicle Path Technologies in Biomimicry, Control, Navigation and Sensing // *IEEE Access*. — 2024. — P. 46202-46231. — DOI: 10.1109/ACCESS.2024.3380458.
13. Won-Shik Chu, Kyung-Tae Lee, Sung-Hyuk Song. Review of biomimetic underwater robots using smart actuators // *International journal of precision engineering and manufacturing*. — 2012. — Vol. 13. — P. 1281-1292. — DOI: 10.1007/s12541-012-0171-7.
14. Fong-Chen Chiu, Jenhwa Guo, Ji-Gang Chen, Yen-Hwa Lin. Dynamic characteristic of a biomimetic underwater vehicle // *Proceedings of the 2002 International Symposium on Underwater Technology*. — 2002. — No. 1, Sec. 4. — DOI: 10.1109/UT.2002.1002422.
15. Rui Wang, Shuo Wang, Yu Wang, Long Cheng, and Min Tan. Development and Motion Control of Biomimetic Underwater Robots: A Survey // *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics: Systems*. — 2022. — Vol. 52, Issue 2. — P. 833-844. — DOI: 10.1109/TSMC.2020.3004862.
16. Haimo Bao, Yan Zhang, Meiping Song, Qiao Kong, Xiaohui Hu. A review of underwater vehicle motion stability // *Ocean Engineering*. — 2023. — 287. — 115735.

17. Yu Wang, Chong Tang, Shuo Wang, Long Cheng, Rui Wang, Min Tan, and Zengguang Hou. Target Tracking Control of a Biomimetic Underwater Vehicle Through Deep Reinforcement Learning // IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems. – 2022. – Vol. 33, Issue: 8. – P. 3741-3752. – DOI: 10.1109/TNNLS.2021.3054402.
18. Serchi F.G., Arienti A., Laschi C. Biomimetic Vortex Propulsion: Toward the New Paradigm of Soft Unmanned Underwater Vehicles // IEEE/ASME Transactions On Mechatronics. – 2013. – Vol. 18 (2). – P. 204-2015.
19. Горюнов Д.С., Каримов Т.И., Каримов А.И., Рыбин В.Г., Колев Г.Ю. Проектирование рыбоподобного биоморфного движителя // Международная конференция по мягким вычислениям и измерениям. – 2023. – Т. 1. – С. 97-100.
20. Chunlin Zhou and K. H. Low. Design and Locomotion Control of a Biomimetic Underwater Vehicle With Fin PropulsionMember // IEEE/ASME Transactions on mechatronics. – 2012. – Vol. 17 (1).
21. Jenhwa Guo. Maneuvering and control of a biomimetic autonomous underwater vehicle // Auton Robot. – 2009. – Vol. 26. – P. 241-249. – DOI: 10.1007/s10514-009-9117-z.
22. Praczyk T. Neural collision avoidance system for biomimetic autonomous underwater vehicle // Soft Computing. – 2020. – Vol. 24. – P. 1315-1333. – <https://doi.org/10.1007/s00500-019-03969-6>.
23. Colgate J.E., Lynch K.M. Mechanics and Control of Swimming: A Review // IEEE Journal of Oceanic Engineering. – 2004. – Vol. 29 (3). – P. 660-673.
24. Kim H., Lee B., Kim R. A Study on the Motion Mechanism of Articulated Fish Robot // The 2007 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation, Proceedings, Harbin (China), 2007. – P. 485-490.
25. Zhang Z., Wang Q., Zhang S. et all. Review of Computational Fluid Dynamics Analysis in Biomimetic Applications for Underwater Vehicles // Biomimetics. – 2024. – Vol. 12 (2). – 33 p. – <https://doi.org/10.3390/biomimetics9020079>.
26. Fouladi K., Coughlin D.J. CFD Investigation of Trout-Like Configuration Holding Station near an Obstruction // Fluids. – 2021. – Vol. 6. – P. 204-230.
27. Chung H., Cao S., Philen M., Beran P.S., Wang K.G. CFD-CSD Coupled Analysis of Underwater Propulsion Using a Biomimetic Fin-and-Joint System // Comput. Fluids. – 2018. – Vol. 172. – P. 54-66.
28. Wright M., Luo Y., Xiao Q., Post M., Gorma W., Durrant A., Yue H. CFD-FSI Analysis on Motion Control of Bio-Inspired Underwater AUV System Utilizing PID Control // In Proceedings of the 2020 IEEE/OES Autonomous Underwater Vehicles Symposium (AUV), IEEE: Piscataway, NJ, USA, 2020. – P. 1-6.
29. Li R., Xiao Q., Liu Y., Li L., Liu H. Computational Investigation on a Self-Propelled Pufferfish Driven by Multiple Fins // Ocean Eng. – 2020. – 197. – 106908.
30. Gao P., Huang Q., Pan G., Song D., Gao Y. Research on Swimming Performance of Fish in Different Species // Phys. Fluids. – 2023. – 35. – 061909.
31. Luo Y., Xu T., Huang Q., Hou Z., Pan G. A Numerical Investigation on Thrust and Torque Production of a Batoid Fish with Asymmetric Pectoral Fins Flapping // Ocean Eng. – 2022. – Vol. 263. – P. 112-132.
32. Menzer A., Li C., Fish F., Gong Y., Dong H. Modeling and Computation of Batoid Swimming Inspired Pitching Impact on Wake Structure and Hydrodynamic Performance // In Proceedings of the Vol. 2: Multiphase Flow (MFTC); Computational Fluid Dynamics (CFDTC); Micro and Nano Fluid Dynamics (MNFDTTC), Toronto, Canada, 2022; American Society of Mechanical Engineers: New York, NY, USA; p. V002T05A003.
33. Safari H., Abbaspour M., Darbandi M. Numerical Study to Evaluate the Important Parameters Affecting the Hydrodynamic Performance of Manta Ray's in Flapping Motion // Appl. Ocean Res. – 2021. – Vol. 109. – 102559.
34. Xue Z., Li L., Song Y. The Research of Maneuverability Modeling and Environmental Monitoring Based on a Robotic Dolphin // Appl. Bionics Biomech. – 2021. – 4203914.
35. Cao J., Li Z., Zhou X., Xia D. Numerical Exploration on Pitching Motion of Robotic Dolphin Realized by Pectoral Fin // In Proceedings of the 2021 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation (ICMA), Takamatsu, Japan, 8–11 August 2021; IEEE: Piscataway, NJ, USA, 2021. – P. 628-632.
36. Wu Z., Yu J., Yuan J., Tan M. Analysis and Verification of a Miniature Dolphin-like Underwater Glider // Industrial Robot: An International Journal. – 2016. – 43.6. – P. 628-635.
37. Wu Z., Yang X., Zhou C., Yuan J., Yu J. Dynamics Modeling and Simulation for a Gliding Robotic Dolphin // In Proceedings of the 2016 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics (ROBIO), Qingdao, China, 3–7 December 2016; IEEE: Piscataway, NJ, USA, 2016. – P. 829-834.
38. Wu Z., Yu J., Yuan J., Tan M., Zhang J. Mechatronic Design and Implementation of a Novel Gliding Robotic Dolphin // In Proceedings of the 2015 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics (ROBIO), Zhuhai, China, 6–9 December 2015; IEEE: Piscataway, NJ, USA, 2015. – P. 267-272.

39. Zhang X., Wang J., Wan D. CFD Investigations of Evolution and Propulsion of Low-Speed Vortex Ring // *Ocean Engineering*. – 2020. – 195. – 106687.
40. Bi X., Zhu Q. Dynamics of a Squid-Inspired Swimmer in Free Swimming // *Bioinspiration & Biomimetics*. – 2019. – 15. – 016005.
41. Anderson E.J.; Grosenbaugh M.A. Jet Flow in Steadily Swimming Adult Squid // *J. Exp. Biol.* – 2005. – 208. – P. 1125-1146.
42. Olcay A.B., Malazi M.T. The Effects of a Longfin Inshore Squid's Fins on Propulsive Efficiency during Underwater Swimming // *Ocean Engineering*. – 2016. – 128. – P. 173-182.
43. Luo Y., Xiao Q., Zhu Q., Pan G. Pulsed-Jet Propulsion of a Squid-Inspired Swimmer at High Reynolds Number // *Phys. Fluids*. – 2020. – 32. – 111901.
44. Malazi T.M. Design Optimization of a Longfin Inshore Squid Using a Genetic Algorithm // *Ocean Engineering*. – 2023. – 279. – 114583.
45. Дуриляк В.В., Кизилова Н.Н., Корякина О.А., Халин А.И., Шишов Н.И. Оценка аэродинамических характеристик бионических форм // *Механика. Исследования и инновации*. – 2021. – Вып. 14. – С. 21
46. Галушко И.Д., Салмина В.А. и Макарьян Г.М. Разработка испытательного стенда для тестирования системы управления подводного робота с изменяемой геометрией корпуса // *Динамика и виброакустика*. – 2019. – Т. 5, № 3. – DOI: 10.18287/2409-4579-2019-5-3-6-13.

REFERENCES

1. Navy develops “Ghost Swimmer” drone that looks like a shark. Seriously. Available at: <https://www.csmonitor.com/USA/Military/2014/1216/Navy-develops-GhostSwimmer-drone-that-looks-like-a-shark.-Seriously> (accessed 24 October 2024).
2. Szymak P. Research on biomimetic underwater vehicles undertaken at Institute of Electrical Engineering and Automatics, *Maritime Technical Journal*, 2016, Vol. 206 (3), pp. 107-119. DOI: 10.5604/0860889X.1224752.
3. Malec M., Morawski M., Szymak P., Trzmiel A. Analysis of Parameters of Traveling Wave Impact on the Speed of Biomimetic Underwater Vehicle, *Solid State Phenomena*, 2014, Vol. 210, pp. 273-279.
4. Szymak P., Praczyk T., Naus K., Szturomski B., Malec M., Morawski M. Research on biomimetic underwater vehicles for underwater ISR, *Ground/Air Multisensor Interoperability, Integration, and Networking for Persistent ISR VII*. SPIE, 2016, Vol. 9831, pp. 126-139. DOI: 10.1117/12.2225587.
5. Bocharov A.Yu. Sovremennyye tendentsii v razvitii miniaturnykh podvodnykh apparatov i robotov za rubezhom [Modern trends in the development of miniature underwater vehicles and robots abroad], *Podvodnye issledovaniya i robototekhnika* [Underwater research and robotics], 2006, No. 2, pp. 36-52.
6. Yatsun S.F., Lushnikov B.V., Kazaryan K.G., Vorochaeva L.Yu., Vorochaev A.V. Konstrukivnye osobennosti bionicheskogo robota-ryby [Design features of the bionic robot-fish], *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya Tekhnika i tekhnologii* [Bulletin of the South-West State University. Series Engineering and Technology], 2017, No. 2 (23), pp. 94-102.
7. Yatsun S.F., Korolev V.I., Bondyrev V.E., Lushnikov B.V. Razvitie malyykh i srednikh avtonomnykh neobitaemykh podvodnykh apparatov na osnove bionicheskikh (rybopodobnykh) printsiptov dvizheniya dlya resheniya zadach podrazdeleniy spetsial'nogo naznacheniya VMF RF [Development of small and medium autonomous unmanned underwater vehicles based on bionic (fish-like) principles of motion to solve problems of special forces units of the Russian Navy], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2019, No. 1 (203), pp. 98-109. DOI: 10.23683/2311-3103-2019-1-98-109.
8. Shchur N.A., Mitin I.V., Korotaev R.A., Mironov V.I., Kazantsev V.B. Eksperimental'noe issledovanie i chislennoe modelirovanie gidrodinamiki rybopodobnogo podvodnogo robota [Experimental study and numerical modeling of the hydrodynamics of a fish-like underwater robot], *Robototekhnika i tekhnicheskaya kibernetika* [Robotics and technical cybernetics], 2023, Vol. 11, No. 1, pp. 40-44. DOI: 10.31776/RTCJ.11105.
9. Abbasov I.B., Tikhomirov S.A. Obzor nekotorykh sovremennykh avtonomnykh biomimeticheskikh podvodnykh apparatov [Review of some modern autonomous biomimetic underwater vehicles], *Cifra. Mashinostroenie* [Cifra. Mechanical Engineering], No. 3 (4). DOI: <https://doi.org/10.60797/ENGIN.2024.4.1>.
10. Ren K., Yu J. Research status of bionic amphibious robots: A review, *Ocean Engineering*, 2021, Vol. 227. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2021.108862.
11. He Y., Xie Y., Pan G. [et al.]. Depth and Heading Control of a Manta Robot Based on S-Plane Control, *Journal of Marine Science and Engineering*, 2022, Vol. 10, pp. 1698. DOI: 10.3390/jmse10111698.
12. Hasan K. et al. Oceanic challenges to technological solutions: a review of autonomous underwater vehicle path technologies in biomimicry, control, navigation and sensing, *IEEE Access*, 2024, pp. 46202-46231. – DOI: 10.1109/ACCESS.2024.3380458.

13. Won-Shik Chu, Kyung-Tae Lee, Sung-Hyuk Song. Review of biomimetic underwater robots using smart actuators, *International journal of precision engineering and manufacturing*, 2012, Vol. 13, pp. 1281-1292. DOI: 10.1007/s12541-012-0171-7.
14. Fong-Chen Chiu, Jenhwa Guo, Ji-Gang Chen, Yen-Hwa Lin. Dynamic characteristic of a biomimetic underwater vehicle, *Proceedings of the 2002 International Symposium on Underwater Technology*, 2002, No. 1, Sec. 4. DOI: 10.1109/UT.2002.1002422.
15. Rui Wang, Shuo Wang, Yu Wang, Long Cheng, and Min Tan. Development and Motion Control of Biomimetic Underwater Robots: A Survey, *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics: Systems*, 2022, Vol. 52, Issue 2, pp. 833-844. DOI: 10.1109/TSMC.2020.3004862.
16. Haimo Bao, Yan Zhang, Meiping Song, Qiao Kong, Xiaohui Hu. A review of underwater vehicle motion stability, *Ocean Engineering*, 2023, 287, 115735.
17. Yu Wang, Chong Tang, Shuo Wang, Long Cheng, Rui Wang, Min Tan, and Zengguang Hou. Target Tracking Control of a Biomimetic Underwater Vehicle Through Deep Reinforcement Learning, *IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems*, 2022, Vol. 33, Issue: 8, pp. 3741-3752. DOI: 10.1109/TNNLS.2021.3054402.
18. Serchi F.G., Arienti A., Laschi C. Biomimetic Vortex Propulsion: Toward the New Paradigm of Soft Unmanned Underwater Vehicles, *IEEE/ASME Transactions On Mechatronics*, 2013, Vol. 18 (2), pp. 204-215.
19. Goryunov D.S., Karimov T.I., Karimov A.I., Rybin V.G., Kolev G.Yu. Proektirovaniye rybopodobnogo biomorfnoogo dvizhitelya [Design of a fish-like biomorphic propulsor], *Mezhdunarodnaya konferentsiya po myagkim vychisleniyam i izmereniyam* [International Conference on Soft Computing and Measurements], 2023, Vol. 1, pp. 97-100.
20. Chunlin Zhou and K. H. Low. Design and Locomotion Control of a Biomimetic Underwater Vehicle With Fin Propulsion Member, *IEEE/ASME Transactions on mechatronics*, 2012, Vol. 17 (1).
21. Jenhwa Guo. Maneuvering and control of a biomimetic autonomous underwater vehicle, *Auton Robot*, 2009, Vol. 26, pp. 241-249. DOI: 10.1007/s10514-009-9117-z.
22. Praczyk T. Neural collision avoidance system for biomimetic autonomous underwater vehicle, *Soft Computing*, 2020, Vol. 24, pp. 1315-1333. Available at: <https://doi.org/10.1007/s00500-019-03969-6>.
23. Colgate J.E., Lynch K.M. Mechanics and Control of Swimming: A Review, *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 2004, Vol. 29 (3), pp. 660-673.
24. Kim H., Lee B., Kim R. A Study on the Motion Mechanism of Articulated Fish Robot, *The 2007 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation, Proceedings, Harbin (China)*, 2007, pp. 485-490.
25. Zhang Z., Wang Q., Zhang S. et al. Review of Computational Fluid Dynamics Analysis in Biomimetic Applications for Underwater Vehicles, *Biomimetics*, 2024, Vol. 12 (2), 33 p. Available at: <https://doi.org/10.3390/biomimetics9020079>.
26. Fouladi K., Coughlin D.J. CFD Investigation of Trout-Like Configuration Holding Station near an Obstruction, *Fluids*, 2021, Vol. 6, pp. 204-230.
27. Chung H, Cao S, Philen M, Beran P.S, Wang K.G. CFD-CSD Coupled Analysis of Underwater Propulsion Using a Biomimetic Fin-and-Joint System, *Comput. Fluids*, 2018, Vol. 172, pp. 54-66.
28. Wright M., Luo Y, Xiao Q., Post M, Gorma W., Durrant A., Yue H. CFD-FSI Analysis on Motion Control of Bio-Inspired Underwater AUV System Utilizing PID Control, *In Proceedings of the 2020 IEEE/OES Autonomous Underwater Vehicles Symposium (AUV)*, IEEE: Piscataway, NJ, USA, 2020, pp. 1-6.
29. Li R., Xiao Q., Liu Y., Li L., Liu H. Computational Investigation on a Self-Propelled Pufferfish Driven by Multiple Fins, *Ocean Eng.*, 2020, 197, 106908.
30. Gao P., Huang Q., Pan G., Song D., Gao Y. Research on Swimming Performance of Fish in Different Species, *Phys. Fluids.*, 2023, 35, 061909.
31. Luo Y., Xu T., Huang Q., Hou Z., Pan G. A Numerical Investigation on Thrust and Torque Production of a Batoid Fish with Asymmetric Pectoral Fins Flapping, *Ocean Eng.*, 2022, Vol. 263, pp. 112-132.
32. Menzer A., Li C., Fish F., Gong Y., Dong H. Modeling and Computation of Batoid Swimming Inspired Pitching Impact on Wake Structure and Hydrodynamic Performance, *In Proceedings of the Vol. 2: Multiphase Flow (MFTC); Computational Fluid Dynamics (CFDTC); Micro and Nano Fluid Dynamics (MNFDTTC)*, Toronto, Canada, 2022; American Society of Mechanical Engineers: New York, NY, USA; p. V002T05A003.
33. Safari H., Abbaspour M., Darbandi M. Numerical Study to Evaluate the Important Parameters Affecting the Hydrodynamic Performance of Manta Ray's in Flapping Motion, *Appl. Ocean Res.*, 2021, Vol. 109, 102559.
34. Xue Z., Li L., Song Y. The Research of Maneuverability Modeling and Environmental Monitoring Based on a Robotic Dolphin, *Appl. Bionics Biomech.*, 2021, 4203914.

35. Cao J., Li Z., Zhou X., Xia D. Numerical Exploration on Pitching Motion of Robotic Dolphin Realized by Pectoral Fin, *In Proceedings of the 2021 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation (ICMA), Takamatsu, Japan, 8–11 August 2021; IEEE: Piscataway, NJ, USA, 2021*, pp. 628-632.
36. Wu Z., Yu J., Yuan J., Tan M. Analysis and Verification of a Miniature Dolphin-like Underwater Glider, *Industrial Robot: An International Journal*, 2016, 43.6, pp. 628-635.
37. Wu Z., Yang X., Zhou C., Yuan J., Yu J. Dynamics Modeling and Simulation for a Gliding Robotic Dolphin, *In Proceedings of the 2016 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics (ROBIO), Qingdao, China, 3–7 December 2016; IEEE: Piscataway, NJ, USA, 2016*, pp. 829-834.
38. Wu Z., Yu J., Yuan J., Tan M., Zhang J. Mechatronic Design and Implementation of a Novel Gliding Robotic Dolphin, *In Proceedings of the 2015 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics (ROBIO), Zhuhai, China, 6–9 December 2015; IEEE: Piscataway, NJ, USA, 2015*, pp. 267-272.
39. Zhang X., Wang J., Wan D. CFD Investigations of Evolution and Propulsion of Low-Speed Vortex Ring, *Ocean Engineering*, 2020, 195, 106687.
40. Bi X., Zhu Q. Dynamics of a Squid-Inspired Swimmer in Free Swimming, *Bioinspiration & Biomimetics*, 2019, 15, 016005.
41. Anderson E.J., Grosenbaugh M.A. Jet Flow in Steadily Swimming Adult Squid, *J. Exp. Biol.*, 2005, 208, pp. 1125-1146.
42. Olcay A.B., Malazi M.T. The Effects of a Longfin Inshore Squid's Fins on Propulsive Efficiency during Underwater Swimming, *Ocean Engineering*, 2016, 128, pp. 173-182.
43. Luo Y., Xiao Q., Zhu Q., Pan G. Pulsed-Jet Propulsion of a Squid-Inspired Swimmer at High Reynolds Number, *Phys. Fluids.*, 2020, 32, 111901.
44. Malazi T.M. Design Optimization of a Longfin Inshore Squid Using a Genetic Algorithm, *Ocean Engineering*, 2023, 279, 114583.
45. Durshlyak V.V., Kizilova N.N., Koryakina O.A., Khalin A.I., Shishov N.I. Otsenka aerodinamicheskikh kharakteristik bionicheskikh form [Evaluation of aerodynamic characteristics of bionic forms], *Mekhanika. Issledovaniya i innovatsii* [Mechanics. Research and Innovation], 2021, Issue 14, pp. 21
46. Galushko I.D., Salmina V.A. i Makar'yan G.M. Razrabotka ispytatel'nogo stenda dlya testirovaniya sistemy upravleniya podvodnogo robota s izmenyaemoy geometriey korpusa [Development of a test bench for testing the control system of an underwater robot with variable body geometry], *Dinamika i vibroakustika* [Dynamics and Vibroacoustics], 2019, Vol. 5, No. 3. DOI: 10.18287/2409-4579-2019-5-3-6-13.

Гриценко Дмитрий Андреевич – Южный федеральный университет; e-mail: dgricenکو@sfedu.ru; г. Таганрог, Россия; тел.: +78634371794; кафедра инженерной графики и компьютерного дизайна; аспирант.

Аббасов Ифтихар Балакишиевич – Южный федеральный университет; e-mail: ibabbasov@sfedu.ru; г. Таганрог, Россия; тел.: +78634371794; кафедра инженерной графики и компьютерного дизайна; зав. кафедрой; д.т.н.; профессор.

Gritsenko Dmitry Andreevich – Southern Federal University; e-mail: dgricenکو@sfedu.ru; Taganrog, Russia; phone: +78634371794; the Department of Engineering Graphics and Computer Design; postgraduate student.

Abbasov Iftikhar Balakishievich – Southern Federal University; e-mail: ibabbasov@sfedu.ru; Taganrog, Russia; phone: +78634371794; the Department of Engineering Graphics and Computer Design; head of the Department; dr. of eng. sc.; professor.

УДК 629.06, 656.2

DOI 10.18522/2311-3103-2025-1-203-213

А.Л. Охотников

ИНТЕГРИРОВАННАЯ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНАЯ СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ БЕСПИЛОТНЫМ ТРАНСПОРТОМ

Статья описывает результаты разработки и внедрения интеллектуальной системы управления беспилотным поездом «Ласточка» на Московском центральном кольце. Особенностью беспилотной системы управления железнодорожным транспортом является: относительно высокая скорость и большая масса поездов, которые определяют длинный тормозной путь. Необходимо