

ДВИГАТЕЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИХ МАЛОЗАМЕТНЫХ ПОДВОДНЫХ РОБОТОВ, ПОДОБНЫХ РЫБАМ. ОБЗОР

Е.В. Бургов, А.Г. Буш, Е.П. Орлинский, А.А. Малышев

Одной из важных задач робототехники является малозаметное наблюдение за объектами в водной среде. Для решения подобных задач вполне оправданным является применение биоинспирированного подхода. В работе рассматриваются варианты двигательных систем подводных аппаратов для скрытого наблюдения – робот должен морфологически и своим поведением соответствовать объектам живой природы, характерным для большинства водоемов мира. Модельным объектом, соответствующим этому требованию, являются рыбы. В работе рассмотрены важные для темы вопросы морфологии и физиологии рыб: функции плавников, варианты приведения тела рыб в движение (типы плавания), механизмы регуляции плотности тела у рыб. Показано, что удачным решением задачи скрытого наблюдения является создание робота, подобного скумбриевидным (скомброидным, *scombroid*) рыбам, использующего ставридообразный (*carangiform*) тип движения. Это предполагает использование кинематической схемы, в которой локомоторная волна охватывает чуть меньше половины длины корпуса робота. Собраны и проанализированы сведения о применяемых системах актуации и регуляции плавучести роботов, подобных рыбам; отмечены мало проработанные вопросы, связанные с двигательными системами подводных роботов, подобных рыбам.

Ключевые слова: робототехника, биоинспирированный подход, рыбы, подобные рыбам роботы, локомоторная волна, плавники, плавательный пузырь.

1. Введение

Важной задачей робототехники является малозаметное наблюдение. Наблюдение может производиться в различных средах, как то: подводная и надводная, наземная и подземная, воздушная. В статье рассматриваются вопросы, связанные исключительно с подводным наблюдением. Сама по себе задача такого наблюдения не нова, первые работы в этом направлении относятся ещё к прошлому столетию, однако она по-прежнему актуальна. Несмотря на долгую историю исследования, акватории остаются одними из самых мало изученных частей планеты, многие процессы, происходящие в толще воды, например взаимодействия животных, различные виды человеческой деятельности, ограниченно доступны для наблюдателя.

В работе малозаметное наблюдение рассматривается как возможное средство решения некоторых практических задач, условно разделяемых на две группы: *исследовательские*, большей частью биологические, и *разведывательные*. Примеры задач

первой группы: мониторинг численности животных, исследование структуры и динамики сообществ, описание поведения (с видеорегистрацией), экспериментальное изучение, спасение водных животных и т. д. Некоторые из этих задач успешно решаются с помощью уже существующих роботов. Например, для видеорегистрации поведения рыб используется робот SoFi [1]; есть ряд экспериментальных ихтиологических работ, в которых используются роботы [2–4]. Под разведывательными задачами понимается наблюдение, скрытое от человека или технического средства, например, военная разведка, охрана акватории. Примером разведывательных подводных биоподобных роботов может служить робот-сом Charlie [5, 6], разрабатывавшийся в 1990-е гг. Основными проблемами этой группы являются шумы и гидроакустические следы аппаратов, несоответствие их поведения, внешнего вида объектам исследуемой акватории [7].

Для решения задачи подводного наблюдения нередко создаются аппараты различной степени сходства с объектами наблюдения или объектами, харак-

терными для исследуемой акватории. Такой подход называется биоинспирированным, а аппараты – биоинспирированными роботами. Биоинспирированные роботы (bioinspired robots) – роботы, своей морфологией, актуаторами, системой управления, электроникой, другими характеристиками имеющие сходство с живыми организмами [8]. В рамках этого подхода задача маскировки аппарата решается путём придания ему внешнего сходства с модельным объектом, создания аналогов морфологических и анатомических структур, имитации поведения модельного объекта. Биологический объект должен соответствовать акватории, в которой будет применяться аппарат. Без подобного соответствия робота можно будет легко распознать как несвойственный объект для региона. Соответственно, чем шире распространен модельный объект, тем шире акватория, в которой можно применять аппарат. Конечно, допустимы некоторые вариации внешних размеров корпуса, окраски, но значимые проявления принципа движения и связанные с ним модели поведения должны как можно точнее соответствовать объекту.

Цель настоящей работы – на основе актуальной биологической литературы определить модельный объект, наиболее подходящий для создания биоподобных подводных роботов для малозаметного наблюдения, и существенные особенности его движения; используя актуальную техническую литературу, выделить распространённые двигательные системы для создания аналогов морфоанатомических структур модельного объекта и имитации его поведения; определить проблемные места, замедляющие развитие биоинспирированного подхода в подводной робототехнике. Важно отметить, что роботу необходимо как можно дольше находиться под водой, что связано с энергозатратами на перемещение, а на борту необходимо нести аппаратуру для наблюдения – существенны грузоподъёмность и вместительность.

Структура работы такова: сначала будут описаны морфология и общие принципы движения модельного объекта – рыбы; затем – классификация биоподобных подводных роботов; далее будут рассмотрены способы приведения тела рыб в движение и их технические аналоги, после чего – способы регуляции у рыб и подводных аппаратов; в заключении будут отмечены требующие внимания аспекты биоинспирированного подхода для дальнейшего развития подводной робототехники.

■ 2. Биологическая основа работы и классификация подводных роботов, подобных рыбам

В качестве модельного объекта выбраны рыбы – они распространены в большинстве водоемов мира. Данная группа включает весьма значительное количество видов – около 34 500 [9]. Соответственно рыбы имеют множество вариантов анатомических структур и поведения, способов регуляции плавучести, маневрирования и т. д. Важной частью обзора является определение относительно универсальных, существенных и имеющих адекватные технические аналоги характеристик модельного объекта (рыб). Рассмотрение свойств рыб, связанных с движением в воде, также является критически важным как непосредственно для моделирования двигательных систем подводных роботов, так и для маскировки аппаратов.

2.1. Форма и покровы тела, плавники рыб

Различные авторы выделяют от 7 до 11 основных форм тела рыб, таких как веретеновидная, торпедовидная (иногда рассматривается как разновидность веретеновидной формы), стреловидная, сплюснутая с боков, угревидная (змеевидная), лентовидная, шаровидная, плоская и некоторые другие. В природе встречаются также всевозможные переходные варианты. Большинство рыб имеют веретеновидную форму тела. Хорошими пловцами являются рыбы с торпедовидной формой тела (тунцы, марлины, акулы и др.), рыбы, имеющие стреловидную форму тела, способны развивать высокие бросковые скорости (сарган, щука и др.) [10,11].

Рыбы обладают парными (грудные, брюшные) и непарными (спинной, анальный, хвостовой) плавниками (рис. 1).

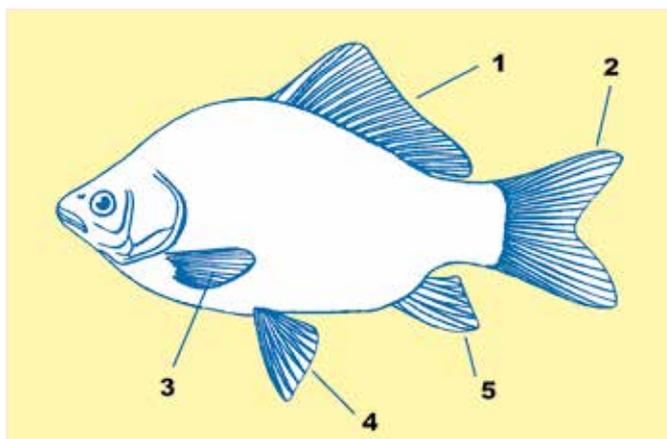


Рис. 1. Плавники рыб: 1 – спинной, 2 – хвостовой, 3 – грудные (парные), 4 – брюшные (парные), 5 – анальный

В природе существует множество вариантов, сочетаний и видоизменений плавников. Непарных плавников может быть несколько. Так, трескообразные рыбы имеют три спинных и два анальных плавника. Лососеобразные и некоторые другие группы рыб помимо спинного имеют непарный жировой плавник, расположенный за спинным. У некоторых рыб спинной или анальный плавник может вовсе отсутствовать.

Особую роль в плавании рыб играют кожные покровы, чешуя и железы, выделяющие слизь. Максимальное сглаживание покровов тела и их смазка минимизируют трение тела о воду и ослабляют турбулентность потока, увеличивая скорость движения рыбы [11]. Слизь рыб состоит в основном из белков и полисахаридов, но её состав и активность могут различаться у разных видов [12]. Например, у барракуд слизь снижает трение тела о воду примерно на 65%, также высокой активностью обладает слизь некоторых лососёвых, в то время как у тунцов и скумбрий, способных развивать высокую скорость, слизь существенной роли в снижении трения не играет [10]. Характер чешуйного покрова (размер, рельеф чешуи, её расположение на теле и т.д.) также функционально связан с тем или иным способом передвижения рыб. Эти аспекты заслуживают отдельного обсуждения, в настоящей работе описываются лишь тезисно, так как в ней рассматриваются характеристики двигательных и гидростатических систем.

Рассмотрение морфологии модельного объекта помогает сузить поиски наиболее распространённого в водной среде объекта. Далее перейдём к рассмотрению принципов движения рыб.

2.2. Общие принципы движения рыб

У рыб сочетаются два основных принципа движения в воде: первый – поддержание плавучести, близкой к нулевой; второй – создание импульса при помощи движения тела и плавников [13]. Ползание по поверхности субстрата и полёт в работе не рассматриваются, так как это очень специфические типы движения. Они мало пригодны для малозаметного наблюдения, так как видов, использующих эти типы движения, относительно немного. Регуляция плавучести может осуществляться при помощи разных тканей и органов. На-

пример, у акул плотность тела, близкая к плотности воды, обеспечивается жировой тканью [10]. Однако наиболее распространенным у рыб, активным способом регуляции плавучести, перспективным с точки зрения создания биотехнических аналогов, является использование плавательного пузыря. Создание импульса обеспечивается мускулатурой, приводящей в движение туловище и плавники.

Существует множество вариантов движения рыб и их сочетаний (рис. 2) [14]. На изображении типы плавания расположены вдоль вертикальной оси в соответствии с участием тела и плавников (затененная область) в создании импульса, а вдоль горизонтальной оси – переход от ундуляции тела или плавников (локомоторная волна) к осцилляции плавников (колебательные гребные движения).

Эволюционно первичным является способ движения при помощи мускулатуры тела с формированием локомоторной волны [13], для которого определено несколько типов (рис. 2, п.1–4). При кузовковообраз-

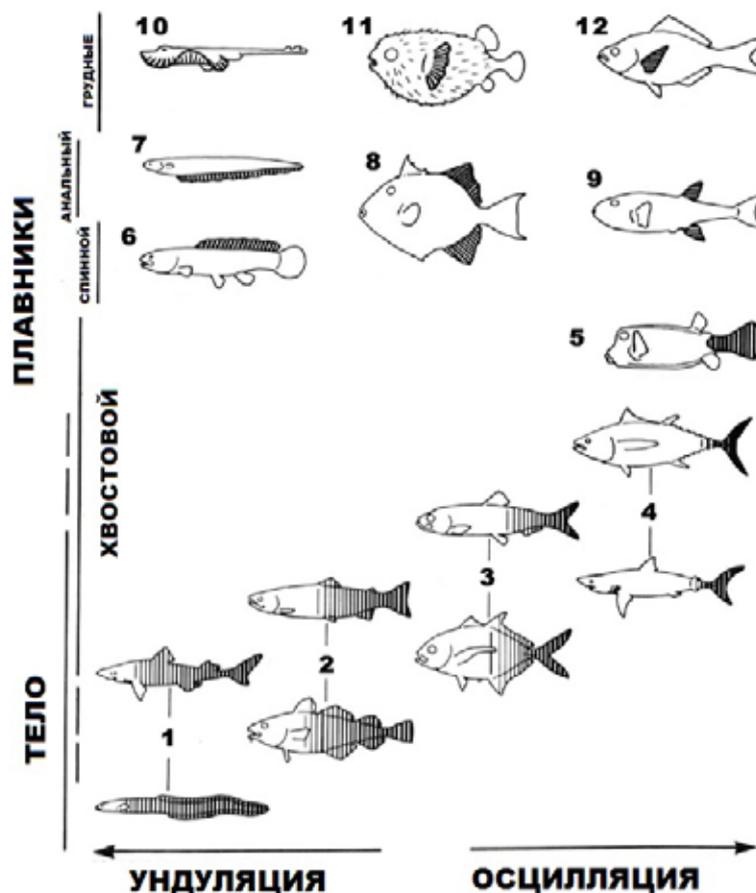


Рис. 2. Типы плавания у рыб, по: [14], с изменениями. 1 – угреобразный (anguilliform), 2 – субставридообразный (subcarangiform), 3 – ставридообразный (carangiform), 4 – тунцеобразный (tunniform), 5 – кузовковообразный (ostraciiform), 6 – амиеобразный (amiiform), 7 – гимнотообразный (gymnotiform), 8 – спинорогообразный (balistiform), 9 – иглобрюхообразный (tetraodontiform), 10 – скатообразный (rajiform), 11 – двузубообразный (diodontiform), 12 – губанообразный (labriform)

ном (ostraciiform, рис. 2, п.5) типе плавания подвижен только хвостовой стебель. Также есть разнообразные типы движения исключительно при помощи плавников (рис. 2, п.6–12).

Ознакомившись с общими принципами движения рыб, обратимся к классификации роботов, подобных рыбам.

2.3. Классификация биоподобных подводных роботов

Работы по созданию роботов, подобным рыбам, ведутся давно. Некоторые современные работы по теме: роботы, подобные китовой акуле [15], щуке [16], тунцу [17]. Среди обзорных статей можно выделить работы [18–20]. В большинстве обзоров используется классификация (рис. 3), основанная на работе К. Бредера 1926 г. «Передвижение рыб» («The locomotion of fishes») [13]. Основа классификации – способ приведения тела робота в движение. Выделяются две большие группы:

- роботы, приводимые в движение, при помощи тела и/или хвостового плавника, АТХ (body and/or caudal fin actuation, ВСА);
- роботы, приводимые в движение при помощи парных, анального или спинного плавников, АПАС (median and/or paired fin actuation, МРА).

Реактивный способ движения, упоминающийся в ряде работ, у рыб мало представлен, а биоподоб-

ные робототехнические системы, использующие реактивное движение, обычно являются аналогами других групп животных (например, роботы-медузы).

Обобщая, можно заключить, что рыбы являются хорошим модельным объектом. При высокой степени разнообразия их видов большинство имеет веретеновидную форму. Основные принципы движения рыб в воде – близкая к нулевой плавучесть (за счёт различных тканей и органов) и обеспечение движение тела хвостом и плавниками. Кожные покровы рыб, чешуя, железы способствуют уменьшению трения тела о воду. Характер движений тела и плавников рыб определяет тип их плавания. Эволюционно первичным считается движение с формированием локомоторной волны.

3. Приведение тела в движение

Множество подводных автономных аппаратов приводятся в движение двигателями с гребными винтами. Эти устройства создают характерные шумы и завихрения, из-за которых аппарат легко распознаётся. Чтобы оставаться скрытыми в подводных условиях, используются различные подходы, в том числе создаются механизмы перемещения, подобные способам перемещения рыб. Далее рассматриваются способы приведения тела рыб в движение и их технические аналоги.

Типы плавания роботов, подобных рыбам	Актуация при помощи тела и\ или хвостового плавника (АТХ)		Ундуляционные (АТХ-У)
			Осцилляторные (АТХ-О)
	Актуация при помощи парных и\ или анального, спинного плавников (АПАС)		Ундуляционные (АПАС-У)
			Осцилляторные (АПАС-О)

Рис. 3. Типы плавания роботов, подобных рыбам. Классификация, используемая в работах [12, 17] (фрагмент, перевод)

3.1. Ундуляция тела у рыб (локомоторная волна)

Локомоторная волна – волнообразное изгибание части туловища и хвостового стебля, при котором рыба отталкивается от толщи воды телом и хвостовым плавником. Как отмечено ранее, движение при помощи локомоторной волны части туловища и хвоста является эволюционно первичным типом перемещения у рыб. У большинства рыб использование этого типа движения сохраняется даже при наличии иных [13].

Такое движение имеет два крайних типа: угреобразное (*anguilliform*) и кузовковообразное (*ostraciiform*) [13] (рис. 2). Оба типа характеризуются тем, что импульс создаёт сегментированная мускулатура туловища. Отличаются они относительной длиной части тела, по которой проходит локомоторная волна, её амплитудой и частотой. Промежуточным типом движения является скомброидный (скомбриевидный). При угреобразном типе движения локомоторная волна имеет большую амплитуду и малую частоту, при кузовковообразном – малую амплитуду и большую частоту. В сравнении с угреобразным типом при скомброидном движении обычно частота локомоторной волны выше, а амплитуда меньше [10, 11, 21]. Среди скомброидных рыб многие авторы выделяют несколько типов движения: ставридообразный (*carangiform*), субставридообразный (*subcarangiform*) и тунцеобразный (*tunniform*) (рис. 4) [21].

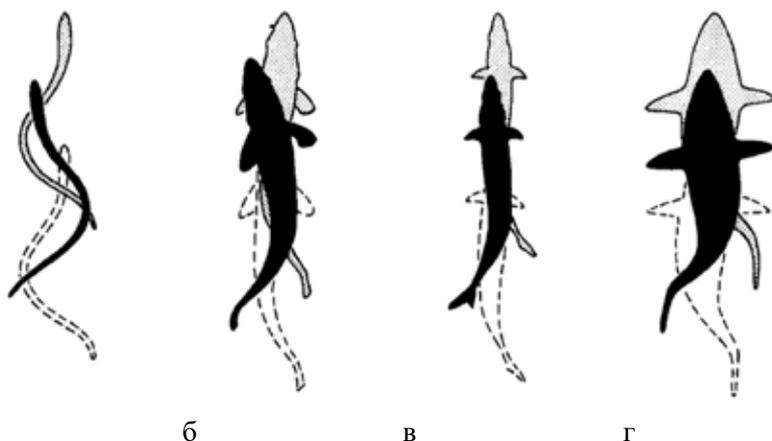


Рис. 4. Типы плавания рыб: а – угреобразный (*Anguilliform*); б – субставридообразный (*Subcarangiform*); в – ставридообразный (*Carangiform*); г – тунцеобразный (*Tunniform*). По [21], с изменениями

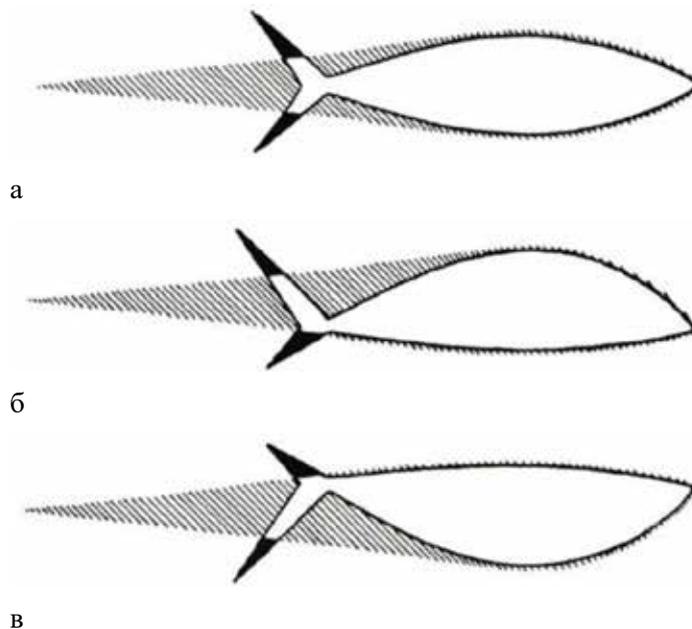


Рис. 5. Схемы расположения лопастей хвостового плавника относительно зоны вихрей и слоя трения при разной форме тела (по [23]): а – при симметричном профиле (изоцеркия); б – при выпуклом верхнем контуре профиля (эпicerкия); в – при выпуклом нижнем контуре профиля (гипоцеркия). Зона вихрей и зона трения заштрихованы

Особую роль в плавании скомброидных рыб играет хвостовой плавник. Он непосредственно участвует в поступательном движении рыбы, нейтрализуя тормозящее движение конца тела и ослабляя обратные токи, а также обеспечивает маневренность рыбы при поворотах. Выделяют множество различных форм хвостового плавника, отличающихся соотношением и формой его лопастей [22]. Весьма распространённое среди рыб разделение хвостового плавника на две лопасти обусловлено особенностями обтекания тела рыбы потоком воды, а именно образованием зоны вихревых потоков. Соответственно форма хвостового плавника непосредственно связана с формой тела рыбы [11, 23]. Основные формы хвостового плавника и их связь с формой тела рыбы представлены на рис. 5.

Создание робототехнических аналогов скомброидных рыб является наиболее оправданным при решении задачи малозаметного наблюдения. Это связано, в частности, с их широкой распространённостью в большин-

стве водоемов мира, а также тем, что конструкции, соответствующие угребразному и кузовковообразному типам, требуют больших мощностей от исполнительных устройств. Среди промежуточных типов плавания (субставридообразный, ставридообразный, тунцеобразный) предпочтительным является ставридообразный. Среди этих типов это средний вариант. Соответственно маскировка аппарата под рыб, использующих субставридообразный или тунцеобразный типы движения, потребует меньше усилий, чем при выборе в качестве целевого одного из этих вариантов. При работе над хвостовыми плавниками необходимо учитывать схемы расположения лопастей.

3.2. Актуация при помощи тела или хвостового плавника робота (АТХ)

Самая простая с конструкционной точки зрения схема приведения в движение роботов, подобных рыбам, – неподвижная основная часть с бортовой аппаратурой и подвижная хвостовая часть с двигателем и хвостовым плавником. Подобных аппаратов много (например, работы [24–26]), они применяются для решения различных задач, не связанных с моделированием локомоторной волны, в том числе для моделирования стайного поведения, испытаний аналогов плавательных пузырей, экологических исследований, для приведения в движение крупных объектов (разработано множество плавниковых двигателей для плавсредств). Такие довольно простые системы вполне пригодны для решения задач, не связанных с имитацией движения большинства рыб. Необходимо отметить, что у этой кинематической схемы отчасти есть биологический аналог – кузовковообразный тип движения. Рыбы, использующие его, встречаются в природе относительно редко. В связи с этим, а также тем, что схема подразумевает использование мощного актуатора, она малоприменима – наблюдателю легко отличить робота с такой реализацией движения от живой скомброидной рыбы.

Многие исследования показывают, что рыбы при движении оставляют за собой специфические завихрения воды [27]. Их можно зарегистрировать, например, при помощи ультразвуковых датчиков [28]. На завихрения от локомоторной волны подводных аппаратов не в последнюю очередь оказывает влияние жёсткость конструкции [29].

Как отмечалось ранее, наиболее подходящим модельным объектом являются скомброидные рыбы, использующие ставридообразный тип движения. Работы по созданию таких роботов уже проводились, например, [30]. Встречаются различные спо-

собы создания локомоторной волны: посредством нескольких сервоприводов, зубчатого редуктора, ременной передачи, различных вариаций кулачковых и кривошипно-шатунных механизмов, а также эксцентриков, тросовых систем, мягких элементов конструкции, электроактивных полимеров.

Использование нескольких сервоприводов. Широко распространены варианты конструкций аппаратов с двумя [31, 32] и тремя [33, 34] сервоприводами. В работе [33] подводные аппараты, оснащенные тремя сервоприводами, используются для коллективной транспортировки объектов.

Авторами статьи [34] рассматривается аналогичная система, используемая для плавания хвостом вперед. В работе [35] показано, что при увеличении числа движителей улучшается подвижность части тела, создающей локомоторную волну, но из-за сил трения затрачивается больше энергии на движение.

Для крупных аппаратов улучшение характеристик локомоторной волны и плавности движения хвоста может быть достигнуто за счёт увеличения длины подвижных секций и, как следствие, мощностей сервоприводов. Например, в работе [36] especially due to its low noise, better energetic efficiency, low water turbulence and living animals mimicry. The design of the biomimetic autonomous underwater vehicle (BAUV используются сервоприводы с планетарными редукторами и ременные передачи. Хвостовая часть робота приводится в движение двумя сервомоторами, оснащенными планетарными редукторами для увеличения максимального крутящего момента. Для гашения ударных нагрузок и облегчения работы системы конструкция оснащена ременной передачей.

Стоит отметить, что с ростом числа движителей, их мощности растёт сложность системы управления, в том числе и решения вопроса синхронизации приводов, повышаются требования к бортовой ЭВМ и энергопотреблению в целом, поэтому достижение хорошей подвижности аппаратов исключительно средствами сервоприводов затруднительно.

Вариации кулачковых и кривошипно-шатунных механизмов, эксцентриков. Использование кулачкового механизма – другой метод формирования локомоторной волны – обеспечивает преобразование непрерывного вращения вала двигателя в гармоническое колебание, что делает движения хвоста плавным. В работе [37] представлен пример такой системы. Все основные части механизма расположены в центральной секции аппарата, что облегчает хвостовую часть. Применение такого подхода позволяет равномернее распределять массу аппарата в сравнении с решениями на сервоприводах.

Тросовые системы. Ряд подводных аппаратов [38, 39] реализован с применением тросовой системы, обеспечивающей работу хвостовой части. Эти системы состоят из нескольких тросов, центрального и боковых, и набора пластин, прикреплённых к ним перпендикулярно. При натяжении боковых тросов изменяется положение пластин, тело приходит в движение. Тросовые системы позволяют сократить количество используемых движителей, обеспечить возможность хорошей развесовки аппарата, улучшить подвижность хвоста. Однако по мере увеличения длины хвоста растут и требования к механизму приведения его в движение. Другой недостаток – жёсткая взаимосвязь подвижных элементов – в случае выхода из строя одного элемента аппарат полностью теряет подвижность.

Мягкие элементы конструкции. Наряду с жёсткими конструкциями разрабатываются роботы с мягкими элементами (soft robotics). Подобные решения позволяют повышать эффективность движения локомоторных волн, уменьшать количество движителей. В некоторых работах, например [40], исследуются параметры локомоторных волн на мягких элементах конструкции. В них нередко реализуются лишь отдельные части конструкции, например аналог хвостового стебля и хвостового плавника рыб.

Одним из самых известных мягких роботов-рыб является робот «SoFi» [1] – проект американского института MIT. При небольших размерах этот аппарат телеуправляемо двигается вдоль коралловых рифов Тихого океана. Движение обеспечивается объёмным гидравлическим насосом, приводящим в движение многосекционный хвост. «Робот-тунец» [41] приводится в движение только одним хвостовым сервомотором через сложный многозвенный механизм. Конструкция аппарата находится в мягкой оболочке.

Мягкие элементы, не всегда относясь непосредственно к движителю, оказывают существенное положительное влияние на создаваемую аппаратом локомоторную волну. Среди недостатков их применения можно выделить сложность производства, а в случае нарушения целостности – потерю контроля за перемещением. Последнее в первую очередь связано со сложностью дублирования элементов системы – прорыв мягкого покрытия робота увеличит нагрузку на актуатор, замедлит скорость его работы.

Деформирующиеся полимеры. Нередко применяются технические решения, связанные с полимерами, которые под действием тех или иных факторов меняют свою форму. Например, есть роботы-рыбы с движителями из диэлектрических эластомеров [42] fabrication, and characterization of a soft biomimetic

robotic fish based on dielectric elastomer actuators (DEAs. Движитель фактически занимает большую часть тела робота. Деформация конструкции с формированием локомоторной волны происходит за счет подачи на конструкцию электрического тока.

Другой вариант приведения робота-рыбы в движение при помощи полимеров – «память формы» [43]. Аналогичный, относительно крупный движитель принимает заранее заданную форму при нагревании и остывании. Важные особенности актуаторов из деформирующихся полимеров – их размеры сопоставимы с размером робота, необходимость обеспечения высокого напряжения для их работы, невысокая частота и амплитуда сокращений.

В табл. 1 обобщена информация о вариантах создания локомоторной волны телом роботов, подобных рыбам. Чаще всего в работах в качестве движителя используются сервоприводы, аппараты имеют жёсткую оболочку, движение совершается хвостом.

3.3. Движение рыб при помощи плавников

У scombroидных рыб спинной и анальный плавники содействуют поворотам тела вверх и вниз, а также отчасти выполняют роль килей-стабилизаторов при работе хвоста [44]. У некоторых акул удлинённые задние лопасти спинного плавника создают и подъёмную силу. Более значимая подъёмная сила создаётся благодаря анальному плавнику с длинным основанием, например, у сомовых рыб. [11].

Грудные и брюшные (парные) плавники играют роль основных рулей глубины, а кроме того, с их помощью частично осуществляются повороты тела рыбы в горизонтальной плоскости. При малой скорости перемещения грудные плавники могут быть и основными движителями, что позволяет рыбам точно маневрировать, например, для поиска пищи в прибрежной зоне или у дна водоема. Грудные и брюшные плавники совместно с хвостовым плавником позволяют рыбе поддерживать равновесие [11]. Некоторые авторы выделяют также «вёсельный» тип движения при помощи парных плавников, характерный, например, для латимерии. В данном случае движения парных плавников не волновые, а гребные. Парные плавники при этом могут работать как синхронно, так и асинхронно [23].

Существует множество способов движения рыб при помощи анального, спинного и парных плавников. Например, многие виды рыб, имеющие длинные, протяжённые практически по всему телу плавники, могут формировать локомоторные волны на плавниках, а не на туловище (рис. 2, п. 6, 7, 10). Для scombroидных рыб, использующих ставридообразный

Таблица 1. Варианты создания локомоторной волны телом роботов, подобных рыбам

Двигатель	Механизм передачи усилия	Оболочка	Актуатор	Плавная локомоторная волна	Размеры аппаратов*	Характер движения	
						Перемещение	Маневрирование
Сервопривод	Непосредственное крепление к корпусу	Жёсткая	Хвост	±	Малый, средний, крупный	+	-
Двигатель	Кулачковые, кривошипно-шатунные механизмы	Жёсткая	Хвост	+	Средний, крупный	+	-
Сервопривод	Тросовая система	Жёсткая	Хвост	+	Средний, крупный	+	-
Насос	Мягкие полые секции	Мягкая	Хвост	+	Малый, средний	+	±
Сервопривод	Сложный многозвенный механизм	Мягкая	Хвост	+	Средний	+	±
Диэлектрический эластомер	Непосредственно двигателем, электрической ток	Мягкая	Хвост	+	Малый	+	±
Тремочувствительный полимер	Непосредственно двигателем, температурное воздействие	Мягкая	Хвост	+	Малый	+	-
Сервопривод	Непосредственно плавник	Мягкая	Плавник	+	Средний	±	+
Сервопривод	Непосредственно плавник	Жёсткая	Плавник	+	Средний	±	+

* Малый – до 0,2 м, средний – до 1 м, крупный – более 1 м.

тип движения, характерны способы маневрирования и балансирования при помощи парных плавников во время ундуляционного движения вперед, а также описанное выше медленное и точное плавание при помощи парных плавников.

3.4. Актуация при помощи парных или анального, спинного (АПАС) плавников у роботов

Большинство роботов, подобных рыбам, маневрируют при помощи аналогов парных плавников, которые обычно приводятся в движение одиночными сервоприводами и не могут обеспечить перемещения аппарата в толще воды. Такая схема имеет биологическую основу (маневрирование при помощи парных плавников), просто реализуема и часто используется в различных работах. Обеспечение точного маневрирования при помощи аналогов парных, спинного или анального плавников сложнее, чем приведение конструкции в движение локомоторной волной.

Популярный биологический объект, используемый при создании природоподобных роботов, приводимых в движение грудными плавниками, – скаты [45, 46].

Также разрабатываются системы, создающие локомоторные волны на аналогах анального и спинного плавников [47]. Так как в качестве модельного объекта определены scombroидные рыбы, использующие ставридообразный тип движения, на эти работы (моделирование скатов и других рыб с протяженными ундулирующими плавниками) стоит обратить внимание как на источник интересных инженерных решений. В ряде работ используется приведение робота в движение при помощи аналогов грудных плавников [48–50]. Плавники состоят из двух половин. При рабочем движении они раскрыты (перпендикулярны направлению движения), при обратном – сложены (параллельны направлению движения).

Приведение в движение подводных роботов при помощи аналогов парных плавников представляется трудной задачей в силу сложной механики и управления. С этим можно связать относительно

малую распространённость использования этого механизма.

■ 4. Регуляция плавучести

В разделе рассматриваются регуляция плавучести у рыб и системы регулировки плавучести у подводных аппаратов. При создании подводных аппаратов зачастую используются классические балластные системы со сжатым воздухом. Однако эти системы требуют много места, сложной системы управления потоками воды и воздуха, в т.ч. дозаправки воздуха из атмосферы, являются шумными и для высоких показателей производительности требуют много энергии. Так как модельный объект имеет сравнительно небольшие размеры, размещение подобной системы на борту не оправдано.

4.1. Регуляция плавучести у рыб

Плавательный пузырь – гидростатический орган рыб, по своему происхождению являющийся выростом кишечника [19, 20]. Обычно он занимает 5–10 % от объёма тела рыбы и компенсирует изменение его плотности при изменении давления (при погружении, всплытии). Тем самым поддерживается плавучесть рыбы, близкая к нулевой. Плавательный пузырь есть не у всех рыб. У большинства видов рыб, способных совершать быстрые вертикальные миграции (акулы, тунцы, обыкновенная скумбрия), плавательный пузырь редуцирован либо отсутствует [10]. У беспузырных рыб около 5% энергозатрат, связанных с движением, приходится на поддержание положения тела в толще воды [54].

Плотность тела большинства рыб близка к 1,05 кг/л (при удельном весе воды около 1 кг/л) [55]. Без плавательного пузыря или с поврежденным телом тонет в воде, если рыба не может компенсировать его вес активным движением плавников. Плотность тела рыб, не имеющих плавательного пузыря, понижается в основном за счет увеличения жирности их тела, особенно печени (жир имеет плотность около 0,9 кг/л), а также за счёт облегчения скелета. Удержания в толще воды такие рыбы достигают мускульными движениями [56]. Быстро плавающие беспузырные рыбы частично компенсируют отрицательную плавучесть большой подъемной силой, возникающей в районе грудных плавников при большой скорости движения в воде.

Существуют *открытопузырные* и *закрытопузырные* рыбы. В первом случае плавательный пузырь сообщается с кишечником при помощи воздушного

протока, во втором – не сообщается. Примеры открытопузырных рыб: сельдь, лосось, карп, плотва, осётр. Закрытопузырные: кефаль, окунь, треска и др. [10].

При изменении глубины плавания меняется давление воды. Тело рыбы сжимается при увеличении давления. Рыба вынуждена компенсировать такое воздействие давления воды увеличением давления газа в плавательном пузыре (при его наличии). Открытопузырные рыбы могут довольно быстро регулировать давление в пузыре, выпуская избыток газа через воздушный проток и наполняя его, в том числе заглатывая атмосферный воздух, у большинства в регуляции плавучести участвует и газовая железа (красное тело) – образование на внутренней стенке плавательного пузыря, густо пронизанное кровеносными капиллярами. У закрытопузырных рыб давление воздуха в плавательном пузыре изменяется только при помощи газовой железы. Происходит это довольно медленно. Объём плавательного пузыря закрытопузырных рыб может изменяться не более чем на 20% от его состояния в норме (при нейтральной плавучести), что ограничивает свободу их перемещений в толще воды [57].

4.2. Регуляция плавучести у роботов

Ранее было отмечено, что рыбы, не имеющие плавательного пузыря, тратят на поддержание положения тела в воде около 5% от всех затрат на движение. Для роботов расходы на поддержание плавучести в силу высокого потребления актуаторов ещё более существеннее. Для избегания излишних энергозатрат на роботах чаще всего используются гидростатические системы – аналоги плавательных пузырей. Сочетание их и различных движителей встречается у многих подводных аппаратов, в том числе не биоподобных [58].

Функции плавательных пузырей рыб и их технических аналогов отличаются. В большинстве случаев плавательные пузыри рыб компенсируют изменение плотности животного при изменении давления воды (при погружении или всплытии). В то же время гидростатические системы подводных роботов обеспечивают фактическое погружение и всплытие, в некоторых вариантах маневрирование (например, за счёт управления креном).

Для изменения крена подводных роботов широко применяются вытеснители (плунжеры, поршни), воздействующие на закрытые системы. Вытеснительная система робота-ската [59] перегоняет воздух внутри робота, меняя крен. Объём воздуха, находящегося в системе, не меняется. Система другого подводного аппарата [60] управляет креном, перемещая внутри

Таблица 2. Гидростатические системы, применяемые, при создании роботов, подобных рыбам

Исполнительное устройство	Тип системы	Принцип	Возможное перемещение	
			Погружение/всплытие	Маневрирование
Вытеснитель	Открытая	Забор воды	+	–
Вытеснитель	Закрытая	Перемещение противовесов	–	+
Вытеснитель	Закрытая	Сжатие газа	+	–
Диэлектрический эластомер	Закрытая	Сжатие–расширение пузыря	+	+
Нагреватель	Закрытая	Фазовый переход жидкость–газ	+	–

корпуса противовесы, в том числе аккумуляторный блок.

Существуют гидростатические системы, забирающие воду из окружающей среды для уменьшения плавучести. Например, у робота-тунца вытеснитель, приводимый в движение сервомотором, наполняет либо опустошает ёмкость для воды, соответственно понижая и повышая плавучесть [17].

Другой пример гидростатической системы с забором воды из окружающей среды представлен в работе [61], где используется закрытая ёмкость с газом. Если необходимо уменьшить плавучесть, поршни сдвигаются друг к другу, сжимая газ. Освободившийся объем заполняется заборной водой. При необходимости всплытия происходит обратный процесс.

Разрабатываются также пузыри из диэлектрического эластомера [62, 63]. Закрытые плавательные пузыри увеличивают свой объем, а значит, и плавучесть робота при подаче напряжения на мембрану. Создан аналог плавательного пузыря, в котором используется фазовый переход жидкость–газ. Внутри устройства находится жидкость с низкой температурой кипения и нагревательный элемент. При нагревании происходит испарение жидкости и как следствие – расширение пузыря и повышение плавучести робота-рыбы. Данные устройства апробированы на маленьких, около 10 см в длину, роботах [64].

Рассмотренные варианты гидростатических систем автономных подводных роботов представлены в табл. 2.

В технике традиционным подходом регуляции плавучести является использование балластных систем. Для небольших роботов, подобных рыбам, использование такого подхода невозможно из-за громоздкости конструкции. У большинства рыб плавучесть регулируется плавательным пузырьком, некоторым аналогом которых являются гидростатические системы. Анализ работ по теме показал, что чаще встречаются гидростатические системы закрытого типа, а в качестве исполнительных устройств применяются преимущественно вытеснители.

Заключение

Исследования, связанные с созданием природоподобных двигательных систем для подводных роботов, активно развиваются. В ряде аспектов эти работы имеют серьезную биологическую основу и богатую историю. Внимательное рассмотрение биологических модельных объектов, в данном случае рыб, позволяет предлагать решения для многих сложных задач, например, малозаметного подводного наблюдения. За пределом обзора остались сенсорные системы, индивидуальное и групповое поведение.

Удачным модельным объектом для создания исследовательских и разведывательных подводных автономных роботов являются скомброидные (скомбриевидные, *scombroid*) рыбы, использующие ставридообразный (*carangiform*) тип движения, что предполагает использование кинематической схемы, при которой будет создаваться локомоторная волна, охватывающая чуть меньше половины тела робота. Скомброидные рыбы – функциональная, а не систематическая группа. Она объединяет многие виды, обитающие в разных частях света, иногда разительно отличающиеся свойствами, не связанными с типом плавания, а значит, робота можно замаскировать под многих рыб, обитающих в различных водоемах. Кинематическую схему при этом существенно менять не придется.

Существует много подходов приведения подводных аппаратов, подобных рыбам, в движение. Далеко не все способы подходят для задачи обеспечения маскировки аппарата под представителей фауны региона. Как говорилось выше, наиболее подходящим типом движения у рыб для создания аналогичных разведывательных и исследовательских подводных роботов является ставридообразный. Обобщенная информация о рассмотренных схемах представлена в табл. 1. Часть этих систем малоприменима для решения задачи малозаметного наблюдения. Один сервопривод без вспомогательных систем – простая, широко применяемая конструкция, не обеспечивающая плавного волнообразного движения, а значит –

требуемой маскировки. По мере увеличения числа приводов локомоторная волна становится плавнее, но одновременно увеличивается энергопотребление. Системы, в которых используются деформирующиеся полимеры, плохо изучены, на данный момент имеют небольшие размеры и объём, доступный для размещения электроники и полезной нагрузки. Работы, где для движения и маневрирования рассматривались аналоги плавников, показывают, что использование их одних недостаточно для полного обеспечения работоспособности аппаратов. Наиболее перспективным подходом видится одновременное использование хвоста (линейное перемещение) и парных плавников (маневрирование, балансирование, медленные и точные движения). Такой подход требует создания сложной системы управления, увеличивает средний расход энергии, но должен существенно улучшить характеристики локомоторной волны.

Многие рыбы имеют специальный гидростатический орган – плавательный пузырь. Он позволяет им поддерживать нейтральную плавучесть при изменении глубины плавания. Существуют открыто- и закрытопузырные, а также беспузырные рыбы. Закрытопузырные рыбы во время вертикальных миграций тратят на выравнивание давления в плавательном пузыре больше времени, чем открытопузырные. И те и другие могут держаться в толще воды, практически не прилагая к этому усилий (при выровненном давлении в плавательном пузыре). Многие беспузырные рыбы способны к быстрым вертикальным миграци-

ям, но на поддержание положения их тел в толще воды приходится до 5 % всех энергозатрат на движение. Их наличие в природе обеспечивает биологическую основу для того, чтобы отказаться от аналогов плавательного пузыря на подводных биоподобных роботах. Однако в силу уменьшения энергозатрат на поддержание положения аппарата в воде благодаря использованию гидростатических систем их использование всё же оправдано.

В табл. 2 собраны данные по распространённым вариантам исполнения гидростатических систем на роботах, подобных рыбам. Небольшая вариативность исполнений и относительно небольшое количество работ показывает, что тема мало разработана. Необходимо уделить ей должное внимание со стороны научной и инженерной проработки. Стоит также отметить междисциплинарный характер разработки – работы, например, показывают сколь важную роль для подводных роботов, подобных рыбам, имеют достижения в области полимерных технологий, в частности при создании эластичных покровов, способствующих плавности локомоторных волн, движителей (искусственные мышцы). Поэтому необходимо активное вовлечение специалистов смежных областей для качественного улучшения разрабатываемых аппаратов.

Поддержка исследований. Работа выполнена при поддержке НИЦ «Курчатовский институт» (приказ от 28.10.2021 № 2754).

ЛИТЕРАТУРА

- Katzschmann R.K. et al. Exploration of underwater life with an acoustically controlled soft robotic fish // *Sci. Robot.* 2018. Vol. 3, no. 16. P. 1–12.
- Bierbach D. et al. Using a robotic fish to investigate individual differences in social responsiveness in the guppy // *R. Soc. Open Sci.* 2018. Vol. 5, no. 8.
- Bonnet F. et al. Design of a modular robotic system that mimics small fish locomotion and body movements for ethological studies // *Int. J. Adv. Robot. Syst.* 2017. Vol. 14, no. 3.
- Marras S., Porfiri M. Fish and robots swimming together: Attraction towards the robot demands biomimetic locomotion // *J. R. Soc. Interface.* 2012. Vol. 9, no. 73.
- Artifacts - Robot Fish «Charlie». URL: <https://www.cia.gov/legacy/museum/artifact/robot-fish-charlie/> (дата обращения: 10.03.2021).
- Marsh A. Meet Catfish Charlie, the CIA's Robotic Spy. 2021. URL: <https://spectrum.ieee.org/tech-history/silicon-revolution/meet-catfish-charlie-the-cias-robotic-spy> (дата обращения: 10.03.2021).
- Карпов В.В., Ханбекян А.Р., Воробьев В.В. О разработке инфраструктуры для создания биоподобного подводного робота // X Междунар. науч.-практ. конф. «Интегрированные модели и мягкие вычисления в искусственном интеллекте», 17-21 мая 2021, Коломна. 2021. Т. 2. С. 247–257.
- Floreano D., Mattiussi C., Brooks R. *Bio-Inspired Artificial Intelligence: theories, methods, and technologies.* London: The MIT Press, 2000.
- FishBase ver. 12\2020. URL: <http://www.fishbase.org/search.php> (дата обращения: 24.03.2021).
- Никольский Г.В. Экология рыб. Изд. 3-е. М.: Высш. шк., 1974. 367 с.
- Тылик К.В. Общая ихтиология. Калининград, 2015. 394 с.
- Комарова М.Л. О химическом составе слизи щуки и налима // *Бионика.* Вып. 3. Киев: Наукова думка, 1969. С. 84–90.
- Breder C.M. The locomotion of fishes // *Zoologica.* 1926. Vol. IV, no. 5. P. 159–295.
- Lindsey C.C. Form, function, and locomotory habits in fish // *Fish Physiology.* 1978. Vol. 7. P. 1–100.
- Dong H. et al. Development of a Whale-Shark-Inspired Gliding Robotic Fish with High Maneuverability // *IEEE/ASME Trans. Mechatronics.* 2020. Vol. 25, no. 6.
- Currier T.M., Lheron S., Modarres-Sadeghi Y. A bio-inspired robotic fish utilizes the snap-through buckling of its spine to generate accelerations of more than 20g // *Bioinspiration and Biomimetics.* 2020. Vol. 15, no. 5.
- Du S. et al. Design and Control of a Two-Motor-Actuated Tuna-Inspired Robot System // *IEEE Trans. Syst. Man, Cybern. Syst.,* 2019. Vol. 51, no. 8. P. 4670 – 4680.
- Colgate J.E., Lynch K.M. Mechanics and control of swimming: A review // *IEEE J. Ocean. Eng.* 2004. Vol. 29, no. 3. P. 660–673.

19. Chu W. S. et al. Review of biomimetic underwater robots using smart actuators // *Int. J. Precis. Eng. Manuf.* 2012. Vol. 13, no. 7. P. 1281–1292.
20. Raj A., Thakur A. Fish-inspired robots: design, sensing, actuation, and autonomy - a review of research // *Bioinspiration and Biomimetics*. 2016. Vol. 11, no. 3.
21. Fierstine H.L., Walters V. Studies in locomotion and anatomy of scombroid fishes // *Mem. South. Calif. Acad. Sci.* 1968. Vol. 6. P. 1–31.
22. Матюхин В.А. Биоэнергетика и физиология плавания рыб. Новосибирск.: Наука, 1973. 154 с.
23. Алеев Ю.Г. Нектон. Киев: Наукова думка, 1976. 453 с.
24. Shibata M., Sakagami N. Fabrication of a fish-like underwater robot with flexible plastic film body // *Adv. Robot.* 2015. Vol. 29, no. 1., P. 103–113.
25. Castaño M.L., Tan X. Model Predictive Control-Based Path-Following for Tail-Actuated Robotic Fish // *J. Dyn. Syst. Meas. Control. Trans. ASME*. 2019. Vol. 141, no. 7.
26. Shibata M. Fish-Like Robot Encapsulated by a Plastic Film // *Recent Advances in Robotic Systems*. 2016. P. 235–251.
27. Curatolo M., Teresi L., Tre R. The Virtual Aquarium : Simulations of Fish Swimming // *Proc. 2015 COMSOL Conf. Grenoble*. 2015. no. 1.
28. Webber D.M. et al. Caudal differential pressure as a predictor of swimming speed of cod (*Gadus morhua*) // *J. Exp. Biol.* 2001. Vol. 204, No. 20. P. 3561–3570.
29. Tytell E.D. et al. Role of body stiffness in undulatory swimming: Insights from robotic and computational models // *Phys. Rev. Fluids*. 2016. Vol. 1, no. 7.
30. Ay M. et al. Mechatronic design and manufacturing of the intelligent robotic fish for bio-inspired swimming modes // *Electron.* 2018. Vol. 7, no. 118.
31. Лушников Б.В. и др. Бионический плавающий робот для мониторинга природных и техногенных объектов в гидросфере // *Электронный журнал Cloud Sci.* 2014. Т. 1, № 1. С. 61–77.
32. Glaze J. et al. Comparative design, hydrodynamic analysis, and physical performance of fish-like robots // *Appl. Ocean Res.* 2021. Vol. 106.
33. Shao J., Wang L., Yu J. Development of an artificial fish-like robot and its application in cooperative transportation // *Control Eng. Pract.* 2008. Vol. 16, no. 5. P. 569–584.
34. Li L. et al. Exploring the backward swimming ability of a robotic fish: Combining modelling and experiments // *Int. J. Adv. Robot. Syst.* 2016. Vol. 13, no. 5. P. 1–10.
35. Yu J., Wang J., Lu H. Research on the push efficiency of fish-like robot under water // *Inf. Technol. J.* 2013. Vol. 12, no. 15. P. 3233–3236.
36. Morawski M. et al. Fish-like shaped robot for underwater surveillance and reconnaissance – Hull design and study of drag and noise // *Ocean Eng.* 2020. Vol. 217.
37. Scaradozzi D. et al. BCF swimming locomotion for autonomous underwater robots: a review and a novel solution to improve control and efficiency // *Ocean Eng.* 2017. Vol. 130. P. 437–453.
38. Lau W.P., Du R., Zhong Y. Swaying Wire-driven Robot Fish Design and Prototyping // *Comput. Aided. Des. Appl.* 2015. Vol. 12, no. 4.
39. Zhong Y., Du R. Design and implementation of a novel robot fish with active and compliant propulsion mechanism // *Robotics: Science and Systems*. 2016. Vol. 12.
40. Jusufi A. et al. Undulatory Swimming Performance and Body Stiffness Modulation in a Soft Robotic Fish-Inspired Physical Model // *Soft Robot.* 2017. Vol. 4, no. 3.
41. Masoomi S.F. et al. Design, fabrication, and swimming performance of a free-swimming tuna-mimetic robot // *J. Robot.* 2014. Vol. 2014.
42. Shintake J. et al. Soft biomimetic fish robot made of dielectric elastomer actuators // *Soft Robot.* 2018. Vol. 5, no. 4. P. 466–474.
43. Coral W. et al. Design and assessment of a flexible fish robot actuated by shape memory alloys // *Bioinspiration and Biomimetics*. 2018. Vol. 13, no. 5.
44. Васнецов В.В. Функция плавников костистых рыб // *ДАН СССР*. 1941. Т. 31, № 5. С. 503–506.
45. Chen Z. et al. Bio-inspired robotic cownose ray propelled by electroactive polymer pectoral fin // *ASME 2011 International Mechanical Engineering Congress and Exposition, IMECE 2011*. 2011. Vol. 2
46. Gao J. et al. Design and experiments of robot fish propelled by pectoral fins // *2009 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics, ROBIO 2009*. 2009.
47. Struebig K. et al. Design and development of the efficient anguilliform swimming robot-MAR // *Bioinspiration and Biomimetics*. 2020. Vol. 15, no. 3.
48. Singh N., Gupta A., Mukherjee S. A dynamic model for underwater robotic fish with a servo actuated pectoral fin // *SN Appl. Sci.* 2019. Vol. 1, no. 7.
49. Wang W., Xie G. CPG-based locomotion controller design for a boxfish-like robot // *Int. J. Adv. Robot. Syst.* 2014. Vol. 11, no. 1.
50. Naser F.A., Rashid M.T. Enhancement of Labriform Swimming Robot Performance Based on Morphological Properties of Pectoral Fins // *J. Control. Autom. Electr. Syst.* Springer US. 2021. Vol. 32, no 4. P. 927–941.
51. Pham V.A. et al. Dynamic Analysis of a Robotic Fish Propelled by Flexible Folding Pectoral Fins // *Robotica*. 2019.
52. Наумов Н.П., Карташев Н.Н. Зоология позвоночных. Ч. 1. Низшие хордовые, бесчелюстные, рыбы, земноводные. М.: Высш. шк., 1979. 333 с.
53. Держинский Ф.Я., Васильев Б.Д., Малахов В.В. Зоология позвоночных. М.: Академия, 2013. 464 с.
54. Иванов А.А. Физиология рыб. М.: Мир, 2003. 284 с.
55. Андрияшев А.П. Определение естественного удельного веса рыб // *Д. АН СССР*. 1944. Т. 43, № 2. С. 84–87.
56. Алеев Ю.Б. Функциональные основы внешнего строения рыбы. М.: Изд-во АН СССР, 1963. 247 с.
57. Цветков В.И. Гидростатическое и атмосферное давление как фактор среды низших позвоночных // *Зоология (Ихтиология)*. М.: ВИНТИ, 1969. С. 15–31. (Итоги науки).
58. Zhang F., Tan X. Nonlinear observer design for stabilization of gliding robotic fish // *Proceedings of the American Control Conference*. 2014.
59. Cloitre A. et al. Design and control of a field deployable batoid robot. The Fourth IEEE RAS/EMBS International Conference on Biomedical Robotics and Biomechatronics Roma, Italy. June 24–27, 2012. 2012. P. 707–712.
60. Detweiler C. et al. Saving Energy with Buoyancy and Balance Control for Underwater Robots with Dynamic Payloads // *Springer Tracts in Advanced Robotics*. 2009. Vol. 54. P. 429–438.
61. Low K.H. Mechatronics and buoyancy implementation of robotic fish swimming with modular fin mechanisms // *J. Syst. Control Eng.* 2007. Vol. 221, no. 3. P. 295–309.
62. Liu B. et al. Electromechanical Control and Stability Analysis of a Soft Swim-Bladder Robot Driven by Dielectric Elastomer // *J. Appl. Mech. Trans. ASME*. 2017. Vol. 84, no. 9.
63. Wang Y. et al. Bio-inspired soft swim bladders of large volume change using dual dielectric elastomer membranes // *J. Appl. Mech. Trans. ASME*. 2020. Vol. 87, no. 4.
64. Kang B. et al. Robotic soft swim bladder using liquid–vapor phase transition. *Mater. Horizons*. 2021.

Об авторах

БУРГОВ Евгений Вадимович, к.б.н., начальник группы биотехнических систем лаборатории робототехники НБИКСТ-ПТ Национальный исследовательский центр "Курчатовский институт"

Адрес: 123182, г. Москва, пл. Академика Курчатова, д. 1

Область научных интересов: мирмекология, биоподобные технические системы

Тел.: +7 (499) 196-71-00 (доб. 3374)

E-mail: mmformica@yandex.ru

ORCID: 0000-0002-3983-5748

БУШ Андрей Григорьевич, младший научный сотрудник лаборатории поведения низших позвоночных

Институт проблем экологии и эволюции им. А.Н. Северцова

Российской академии наук (ИПЭЭ РАН)

Адрес: 119071, г. Москва, Ленинский проспект, д. 33

Область научных интересов: ихтиология

Тел.: +7(495)952-40-17

E-mail: endryus@inbox.ru

ORCID: 0000-0002-6583-3260

ОРЛИНСКИЙ Евгений Павлович, инженер-исследователь лаборатории робототехники НБИКСТ-ПТ

Национальный исследовательский центр "Курчатовский институт"

Адрес: 123182, г. Москва, пл. Академика Курчатова, д. 1

Область научных интересов: робототехника

Тел.: +7 (499) 196-71-00 (доб. 3158)

E-mail: eorlinskiy@mail.ru

ORCID: 0000-0002-5737-9635

МАЛЫШЕВ Александр Александрович, инженер-исследователь лаборатории робототехники НБИКСТ-ПТ

Национальный исследовательский центр "Курчатовский институт"

Адрес: 123182, г. Москва, пл. Академика Курчатова, д. 1

Область научных интересов: робототехника

Тел.: +7-985-301-11-49, +7 (499) 196-71-00 (доб. 3374)

E-mail: a.san.malyshhev@mail.ru

ORCID: 0000-0001-5419-3379

Для цитирования:

Бургов Е.В., Буш А.Г., Орлинский Е.П., Малышев А.А. ДВИГАТЕЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИХ МАЛОЗАМЕТНЫХ ПОДВОДНЫХ РОБОТОВ, ПОДОБНЫХ РЫБАМ. ОБЗОР // Подводные исследования и робототехника. 2022. № 1 (39). С. 17–31. DOI: 10.37102/1992-4429_2022_39_01_02.

