

**Starchenko Irina Borisovna**

Taganrog Institute of Technology – Federal State-Owned Autonomy Educational Establishment of Higher Vocational Education “Southern Federal University”.

E-mail: star@tsure.ru.

44, Nekrasovskiy, Taganrog, 347928, Russia.

The Department Hydroacoustics and Medical Engineering; Dr. of Eng. Sc.; Professor.

УДК 532.5.032

**С.В. Тарасов**

### **ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ДВИЖИТЕЛЯ БИОНИЧЕСКОГО ТИПА ДЛЯ ПОДВОДНЫХ МИКРОРОБОТОВ**

*На основе обзора и анализа перспектив использования подводных микророботов бионического типа, делается вывод о необходимости корректного моделирования их пропульсивных характеристик.*

*Рассматривается проблема моделирования гидродинамических характеристик движителя, представляющего собой машущий упругий плавник, приводимый в движение элементом с эффектом памяти. Инструментом исследования является разработанный автором программный код «SmartFlow», осуществляющий расчет турбулентного течения несжимаемой жидкости на основе уравнений Навье–Стокса при помощи метода крупных вихрей.*

*Необитаемый подводный аппарат; подводный микроробот; машущий движитель; материал с памятью формы.*

**S.V. Tarasov**

### **COMPUTATIONAL MODELING OF BIOMIMETIC PROPULSOR FOR UNDERWATER MICRO ROBOTS**

*On the basis of review and analysis of perspectives of application of underwater micro robots, a conclusion is made about the necessity of reasonable modeling of their propulsive characteristics.*

*A problem of modeling of hydrodynamic characteristics of a biomimetic propulsor in the form of an elastic flapping fin, driven by a shape memory alloy is considered. The computations have been carried out with use of a software code SmartFlow developed earlier by the author, enabling computation of a turbulent incompressible flow on the basis of Navier–Stokes equations with use of large eddy simulation method.*

*Unmanned underwater vehicle; underwater microrobot; flapping propulsor; shape memory alloy.*

**Применение необитаемых подводных аппаратов.** Существует мнение, что автономные необитаемые подводные аппараты (НПА) – это технология, обеспечивающая завоевание лидирующего экономического положения в мире за счет повышения эффективности подводных работ. Специалистами отмечается ряд неоспоримых преимуществ использования автономных НПА – это более высокая производительность, простота эксплуатации, точность управления, простота транспортировки, меньшая стоимость и др.

В настоящей работе основное внимание уделяется категории малых мини- и микроаппаратов (АМПА). Несмотря на специфическую функциональность и ряд ограничений, следует отметить и преимущества «малых» аппаратов над «большими», которые заключаются в более высокой надежности и простоте конструкции, более легком обслуживании (спуск, подъем на борт, заряд аккумуляторов) и более низкой общей стоимости.

Как показал анализ научно-технических публикаций, основными объектами исследований и разработок в области создания АПМА являются следующие:

- ◆ системы энергообеспечения (поиск путей создания емких и возобновляемых энергоисточников в миниатюрном исполнении);
- ◆ движительно-рулевые комплексы (разработка нетрадиционных систем движения аппарата, как правило, на базе одного двигателя);
- ◆ конструкции на бионических принципах.

Ограничения по массе и размерениям для АПМА приводят к необходимости использования компактных и энергоэффективных движительно-рулевых комплексов низкого напряжения, оснащенных достаточно простой системой управления.

Поэтому перспективные технические решения, внедряемые при проектировании современных подводных мини- и микроробототехнических систем, имеют ряд особенностей по сравнению с традиционными. При формировании конструктивных и гидродинамических схем применяются новые решения, связанные с использованием бионических принципов. На сегодня большая часть моделей АПМА создается именно с использованием бионических принципов и носит экспериментальный характер.

Необходимо отметить, что разработка подводных микророботов бионического типа является одним из приоритетных направлений, о котором говорится во многих исследовательских программах. В частности, в «Перспективных планах развития робототехники на период до 2020 г.», решению этой проблемы уделяется особое место [3].

**Бионические принципы разработки подводных микророботов.** Накопленные знания в области гидродинамических принципов движения рыб и китообразных позволяют сделать вывод о перспективности использования аналогов пропульсивных систем гидробионтов для создания движителей высокоманевренных и эффективных подводных технических объектов.

Пропульсивные системы указанного типа обладают достоинствами в областях, где свойства традиционных движителей не вполне достаточны [4, 5]:

- ◆ являются экологически чистыми;
- ◆ обладают высокой эффективностью;
- ◆ имеют малый уровень акустического излучения;
- ◆ являются многофункциональными в том смысле, что могут эффективно работать на различных режимах движения объекта;
- ◆ могут совмещать в себе функции нескольких устройств (двигателя, управляющего устройства, стабилизатора);
- ◆ эффективны на специальных режимах движения (например, со стопа, в режиме зависания);
- ◆ обеспечивают высокие маневренные качества;
- ◆ обладают приемлемыми кавитационными характеристиками на основных режимах движения;
- ◆ имеют сравнительно низкое аэрогидродинамическое сопротивление в «отключенном» состоянии;
- ◆ имеют простую «механику» и небольшие весовые параметры;
- ◆ для управления и контроля допускают эффективное использование достижений в области современных микроэлектромеханических систем.

Машущий движитель все чаще и чаще стал рассматриваться как альтернативный по отношению к наиболее часто используемому на подводных аппаратах традиционному движителю – гребному винту, так как эффективность винтового движителя малых НПА обычно не превосходит 40 %, и поэтому плавниковый движитель становится хорошей альтернативой, имея дополнительно высокие маневренные, акустические и другие характеристики.

Перечисленные особенности позволяют формализовать основные физические параметры, определяющие работу машущего движителя аэрогидробионта, а значит, могут быть приняты исходными проектными параметрами для технических устройств – прототипов биологических систем. К ним относятся:

- ◆ геометрические размеры, профилировка и форма крыла в плане;
- ◆ закон колебаний и/или деформаций крыла (и тела);
- ◆ амплитуда, частота и угол сдвига фаз колебаний;
- ◆ массово-жесткостные характеристики крыла.

При этом очевидно, что процесс функционирования машущего крыла должен рассматриваться как существенно нестационарный и нелинейный. Исходя из перечисленных особенностей задачи, следует, что она имеет достаточно сложный междисциплинарный характер.

Теоретические исследования влияния указанных параметров на гидродинамические характеристики машущего движителя имеют давнюю историю. Всеобъемлющий обзор работ, посвященных исследованию, моделированию и применению машущих движителей приводится в [4, 5].

Хотя исследования, упомянутые выше, сыграли решающую роль в выработке понимания гидродинамики плавания рыб, но в них не рассматривались обязательные элементы движительно-двигательной системы – приводы, существенно влияющие на общую эффективность всей системы и другие характеристики проектируемого объекта.

**Привод с памятью формы.** Устройства с использованием традиционной технологии механических устройств содержат жесткие связи для подключения вращающихся узлов, шестерни и подшипники. Поэтому такие устройства неизбежно оказываются сложными, жесткими и шумными.

Применение систем типа «искусственная мышца» (таких как сплавы с памятью формы и электроактивные полимеры) позволяют приблизиться к построению подводного технического объекта бионического типа обладающего рядом перечисленных выше достоинств [7]. Следует отметить, что использование других альтернативных «активных материалов» для привода АМПА оказывается неэффективным.

Ионные металл-полимерные композиты (ИМПК) относятся к классу электроактивных полимеров (ЭАП), которые получили название «искусственные мышцы» из-за их сходства с биологическими тканями и способом их срабатывания. В ИМПК эффект срабатывания возникает из-за электрически индуцированного движения ионов.

Еще одним перспективным направлением, связанным с разработкой конструкций актуаторов для движителей бионического типа, является использование сплавов с эффектом памяти. Обзор методов моделирования и применения МПФ можно найти в [1].

Сплавы с эффектом памяти формы (МПФ, например, NiTi, NiTiCu) известны своим огромным потенциалом для использования в качестве элементов привода движителя благодаря высокой плотности энергии.

МПФ имеют следующие преимущества:

- ◆ простота механизма привода, который представляет собой прямой привод линейного действия без дополнительных механических передач,
- ◆ высокая плотность энергии,
- ◆ бесшумная работа,
- ◆ низкое входное напряжение – чтобы привести в действие МПФ, достаточно напряжения порядка десятков вольт.

Конечно, привод на основе SMA не свободен от недостатков. Основным из них является появление усталости под действием повторяющихся циклических нагрузок. Несмотря на последнюю ремарку, может быть сделан вывод о том, что МПФ-актюаторы для использования АПМА являются предпочтительными. В связи с этим в дальнейшем рассматривается проблема моделирования пропульсивных характеристик плавникового движителя с МПФ-актюатором.

**Построение математической модели.** Инструментом исследования является разработанный автором программный код «SmartFlow» [6]. Расчет несжимаемого вязкого потока основывается на нестационарных уравнениях Навье–Стокса с искусственной сжимаемостью. Моделирование турбулентности осуществляется при помощи метода моделирования крупных вихрей (LES) с моделью внутрисеточных напряжений Смагоринского.

Пространственная дискретизация определяющих уравнений осуществляется методом конечных объемов. Уравнения метода конечных объемов на подвижной сетке формируются при помощи Лагранжево–Эйлерова (ALE) подхода. Расчетная сетка деформируется, повторяя движение и деформацию машущего элемента движителя. Положение сетки в каждый момент времени определяется при помощи метода отображения сетки на граф Делоне расчетной области.

Деформированное состояние упругой пластины под воздействием гидродинамических сил и сил инерции определяется на основе геометрически нелинейной модели теории упругости.

В данной работе поведение МПФ-актюатора (привода в виде проволоки с памятью формы), приводящего в движение бионический движитель, моделируется при помощи упрощенной модели.

Эта модель, путем учета деформации в процессе нагружения, позволяет прогнозировать прямое и обратное преобразования при полной петле гистерезиса, а также частную петлю гистерезиса МПФ. Основой модели является предположение, что соотношение между деформацией и напряжением в МПФ может быть представлено в виде совокупности прямолинейных отрезков, форма которых определяется текущим состоянием материала.

**Расчетные результаты.** Рассматриваемый в работе движитель представляет собой гибкое вдоль хорды крыло, осуществляющее вертикально-угловые колебания с помощью МПФ-актюатора. Два независимых комплекта проволок используются для управления вертикальными и вращательными колебаниями крыла, как показано на рис. 1, 2 (пропорциональность на рисунке не соблюдается).

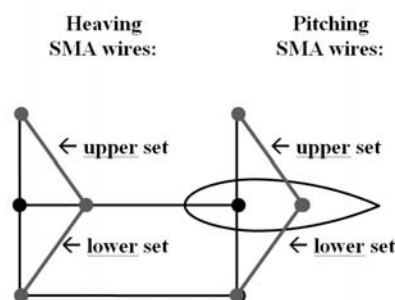


Рис. 1. Схема привода движителя в нейтральном положении

Начиная от нейтрального положения, верхняя часть привода подвергается нагреванию, в результате чего проволока с памятью формы сокращается, вызывая поворот устройства вверх и удлинение нижней части привода. После прекращения

подачи тепла, происходит остывание и обе части привода восстанавливают первоначальную длину, и устройство возвращается в исходное положение. Аналогичный процесс, осуществленный для нижней части привода, вызывает поворот устройства вниз.

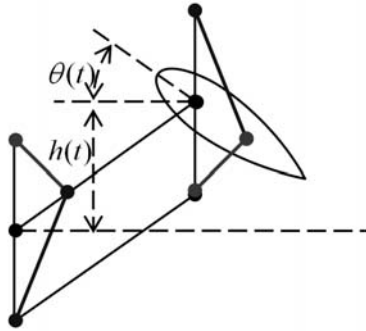


Рис. 2. Схема привода движителя при отклонении

Для исследования было выбрано крыло NASA 0014, совершающее вертикально-угловые колебания в набегающем потоке. Значения параметров задачи соответствуют принятым в экспериментальной работе [30].

Расчеты проводились для следующих случаев:

- ◆ заданных гармонических колебаний жесткого крыла,
- ◆ заданных колебаний крыла, упругого вдоль хорды,
- ◆ колебаний упругого крыла, приводимого в движение при помощи МПФ-актюатора (комплекта проволок с памятью формы).

На рис. 3, 4 результаты численных расчетов сравниваются с экспериментальными данными, полученными для случаев заданного движения крыла в работе [2]. Также на указанных рисунках приводятся результаты расчетов, выполненных для упругого профиля, приводимого в движение МПФ-актюатором.

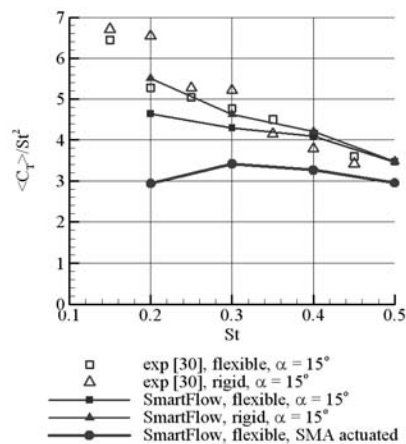


Рис. 3. Зависимость пропульсивной эффективности от числа Струхали

Приведенные зависимости показали, что пропульсивные характеристики, полученные для упругого крыла, приводимого в движение МПФ-актюатором, оказались для рассмотренных параметров бионической двигательной-двигательной сис-

темы ниже, чем случая заданных колебаний жесткого и упругого машущего крыла. Этот факт может объясняться тем, что траектория крыла в рассмотренном случае не была оптимальной.

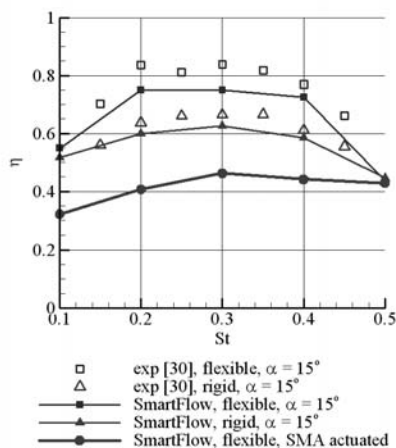


Рис. 4. Зависимость коэффициента средней тяги от числа Струаля

Результаты работы показывают необходимость проведения дальнейших исследований в направлениях:

- ◆ уточнения применяемой математической модели МПФ-актюатора;
- ◆ оптимизации процесса управления термическим воздействием на элементы МПФ-актюатора;
- ◆ поиска и анализа других конструктивных решений двигательного движительного комплекса с МПФ-актюаторами.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Paiva A., Savi M.A. An Overview of Constitutive Models for Shape Memory Alloys // *Mathematical Problems in Engineering*. – Vol. 2006, Article ID 56876. – P. 1-30.
2. Prempraneerach P., Hover F.S., Triantafyllou M.S. The effect of chordwise flexibility on the thrust and efficiency of a flapping foil // *Proceedings of the Thirteenth International Symposium on Unmanned Untethered Submersible Technology*, 2003.
3. “Robotic Visions to 2020 and beyond – The Strategic Research Agenda for robotics in Europe, 07/2009” // [www.robotics-platform.eu](http://www.robotics-platform.eu).
4. Rozhdestvensky K.V., Ryzhov V.A. Aerohydrodynamics of flapping wing propulsion // *Progress in Aerospace Sciences*. – 2003. – Vol. 39. – P. 585-633.
5. Rozhdestvensky K.V., Ryzhov V.A. Flapping-Wing Propulsion // *McGraw-Hill Yearbook of Science and Technology*, McGraw-Hill, 2005.
6. Ryzhov V.A., Tarasov S.V. Large eddy simulation of flow around biomimetic propulsor // *Proceedings of International Conference on Subsea Technologies 22-25 June 2009, St-Petersburg: VIMarEST-SMTU*, 2009.
7. Zhang D., Low K.H., Xie H., Shen L. Advances and Trends of Bionic Underwater Propulsors // *2009 WRI Global Congress on Intelligent Systems*. – 2009. – Vol. 1. – P. 13-19.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н. В.А. Рыжов.

#### Сергей Владимирович Тарасов

Санкт-Петербургский Государственный Морской Технический Университет.

E-mail: sergey\_tarasov@inbox.ru.

198329, Санкт-Петербург, ул. Чекистов, д. 20, кв. 15.

Тел: 89210965148.

Аспирант.

**Sergey Vladimirovich Tarasov**  
Saint-Petersburg State Marine Technical University.  
E-mail: sergey\_tarasov@inbox.ru.  
20, Chekistov Street, Apt. 15, Saint-Petersburg, 198329, Russia.  
Phone: +79210965148.  
Post-graduate Student.

УДК 004.042

**А.А. Чусов**

**КОДИРОВАНИЕ ДОННОГО ИЗОБРАЖЕНИЯ В КАНАЛЕ СВЯЗИ  
АВТОНОМНОГО НЕОБИТАЕМОГО ПОДВОДНОГО АППАРАТА (АНПА)**

*В настоящее время актуальной является проблема анализа изображений, получаемых с автономного необитаемого подводного аппарата (АНПА). Современные системы – это акустические датчики, фото и видеокамеры. Зашумленность изображения – фактор, препятствующий достоверному анализу исследуемых характеристик дна. Методы фильтрации, применяемые на практике, используют усреднение яркостных значений соседних пикселей. При этом присутствует потеря высокочастотных составляющих изображения. В представленной статье рассматриваются способы фильтрации и компрессии изображений донной поверхности водоемов, полученных с АНПА. При этом предполагается, что полученное изображение вместе с данными о положении АНПА будут посылаться по низкоскоростному гидроакустическому каналу на надводную станцию.*

*Обработка донных изображений; АНПА; цифровая фильтрация; компрессия; кодирование изображений.*

**A.A. Chusov**

**ENCODING IMAGES OF BOTTOMS OF WATER BODIES IN A CHANNEL  
OF CONNECTION AUTONOMOUS UNDERWATER VEHICLE (AUV)**

*Nowadays there is an actual problem of analyzing images were got from an autonomous underwater vehicle (AUV). Actual systems are acoustic sensors, photo and video cameras. Noisiness of the images is a factor creating many difficulties for precise analysis of the bottom being explored. Applied methods of filtration use approximation of brightness of adjacent pixels of an image. During the approximation there is a loss of high frequency parts of the image. In the article methods of filtration and compression of images of bottoms of water bodies got using AUV are reviewed. It is assumed that a resulting image packed with AUV coordinates will be sent to a surface station via low speed acoustic channel.*

*Processing bottom images; AUV; digital filtration; digital compression; image encoding.*

Необходимость фильтрации указанных данных обусловлена наличием суммарной помехи (реверберационной и шумовой). По взаимодействию с полезным сигналом помехи различаются на аддитивные и мультипликативные. К аддитивным относятся наиболее распространенная флуктуационная, а также импульсная помеха. Для оценки степени зашумленности сигнала используется анализ пикового отношения сигнал-шум, при котором вычисляется среднеквадратичное отклонение яркости пикселей тестового изображения при отсутствии помехи и при ее наличии. Однако такой критерий зашумленности не всегда соответствует качеству зрительного восприятия изображения.

Другой актуальной задачей является компрессия сигнала. В работе предполагается, что глубина одного пиксела донного изображения составляет 1 байт, описывающий одну из 256 градаций серого. Максимальная скорость передачи данных