

Машущее крыло – перспективы использования



Владимир Рыжов, д-р техн. наук, проф., Санкт-Петербургский государственный морской технический университет

Идея использования тяги, генерируемой машущим крылом, родилась давно из наблюдений за полетом птиц и плаванием рыб. Еще Леонардо да Винчи пытался объяснить механизм создания им силы тяги и использовать его на практике. Позднее в конце XIX – начале XX вв. были предприняты многочисленные попытки разработать действующие летательные аппараты с машущим крылом, которые из-за недостаточности научных и инженерных знаний были обречены на неудачу. В результате многолетней исследовательской работы, проводимой с 30–40-х гг. XX в. и вплоть до наших дней был накоплен обширный материал, показывающий, что целый ряд аэрогидробионтов (живых организмов, обитающих в толще воды и атмосфере) обладает совершенными аэрогидродинамическими качествами, по ряду показателей превосходящими характеристики существующих технических объектов.

В настоящее время практические вопросы создания энергетически более экономичных и более эффективных транспортных средств, интерес, проявляемый к автономным аэро- и гидромикрообъектам, к системам преобразования «неисчерпаемой» энергии моря и ветра, ставят машущие крыльевые устройства в один ряд с другими пропульсивными системами, которые могут быть эффективно использованы в этих целях.

Безусловно, задача создания полноценного аппарата с машущим крылом является мультидисциплинарной, так как должен рассматриваться комплекс проблем, связанных с разработкой

всех систем объекта. Помимо очевидного вклада аэрогидродинамики и биологии, для эффективного решения задачи необходимы исследования в области современных конструкционных материалов, теории автоматического управления, микроэлектромеханических технологий, микропроцессорных систем, теории искусственного интеллекта и пр.

Биологические предпосылки

Тезис о том, что живой организм в результате эволюции наилучшим образом приспособляется к своей среде обитания, подтвержден многочисленными биологическими исследованиями. Они позволяют заключить, что наиболее совершенными гидродинамическими

качествами и вязкостных сил. Диапазон этих чисел для биологических объектов, использующих для своего движения механизм машущего крыла, довольно широк и лежит в диапазоне от 10^1 до 10^8 . Числа в нижней части диапазона характерны для летающих биологических объектов, в верхней – для плавающих. Очевидно, что рассматриваемые летающие и плавающие биологические объекты используют сходные механизмы создания сил, однако физические аспекты их применения различны. Механизм летающих объектов нацелен на создание постоянно действующей подъемной силы, поддерживающей тело в среде с малой плотностью; механизм плавающих объектов – на преодоление сопротивления среды, плотность которой на три порядка выше плотности воздуха. Природа предоставила биологическим объектам широкий спектр возможностей для достижения оптимальных результатов при перемещении в среде.

Несмотря на указанные различия, у насекомых, птиц, рыб, китообразных проявляются в определенной степени схожие эффекты функционирования, обусловленные использованием однотипного механизма движения – машущего крыла. При практической реализации движителя важно учесть следующие факторы аэрогидродинамики биологических объектов (как летающих, так и плавающих):

- специфическую кинематику движения крыла (плавника);
- способность управления вихревыми структурами, сходными с крыла (и тела);
- способность использования энергии (вихревых структур) окружающего

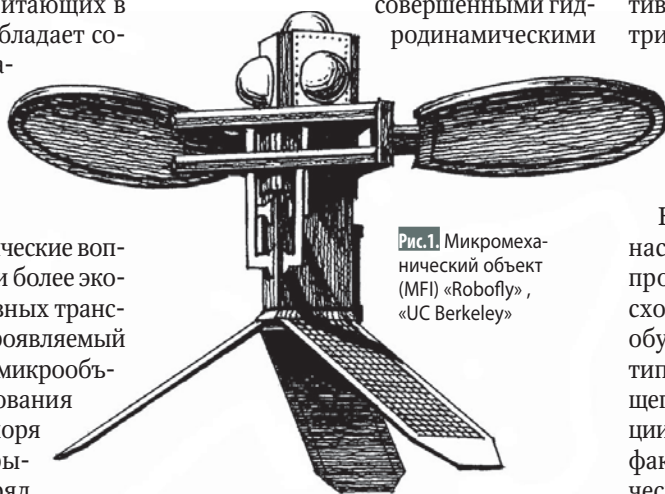


Рис.1. Микромеханический объект (MFI) «Robofly», «UC Berkeley»

качествами в природе обладают дельфины, а наибольшую относительную скорость развивают птицы и насекомые.

Одним из определяющих параметров, характеризующих физическую картину обтекания, является число Рейнольдса, выражающее соотношение инерцион-

потока для повышения эффективности движения (например, перемещение в волновых, стратифицированных, возмущенных потоках; вблизи границ раздела сред; групповые перемещения и пр.);

- «конструктивные» особенности крыльев биологических объектов для эффективной организации потока при больших углах атаки, предотвращающие неблагоприятный отрыв потока;

- изменяемую геометрию и упругость крыла, подстраивающихся под конкретный режим движения;

- существенные амплитуды колебаний и/или деформации крыла (и тела);

- возможность «многорежимного» характера движения (например, чередование машущего полета/плавания с фазами планирования).

Перечисленные особенности позволяют формализовать основные физические параметры, определяющие работу машущего движителя аэрогидробионта, а значит, могут быть приняты в качестве исходных проектных параметров 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 и частота колебаний, угол сдвига фаз между колебаниями и массожесткостные характеристики крыла (в общем случае переменные по хорде и размаху).

Вышесказанное – это отправная точка для теоретических, экспериментальных и практических работ по созданию технических объектов с машущим крылом. Однако при этом следует помнить, что слепое копирование отдельных свойств аэрогидробионтов в данном случае вряд ли приведет к положительным результатам. Необходим тщательный анализ применимости тех или иных решений, заимствованных у живой природы.

Технические аспекты использования машущего крыла

Причиной интенсивных теоретических, экспериментальных, инженерных исследований машущего движения является тот факт, что пропульсивные системы подобного типа обладают рядом достоинств:

- высокой эффективностью;
- малым уровнем акустического излучения (при низких частотах машущего движения);
- многофункциональностью т.е. воз-

можностью эффективно работать при различных режимах движения объекта, в том числе и специальных, например при зависании;

- высокими маневренными качествами;

- приемлемыми кавитационными характеристиками на основных режимах движения;

- сравнительно низким аэрогидродинамическим сопротивлением в «отключенном» состоянии;

- простой механикой и малым весом.

Кроме того, они могут совмещать в себе функции нескольких устройств (двигателя, управляющего устройства, стабилизатора), а для управления и контроля допускают эффективное использование достижений в области современных микроэлектромеханических систем и технологий микросистем.

Очевидно,



Рис. 2. Микролетательный аппарат «Microbat», фирма «AeroVironment»

что перечисленные свойства говорят о перспективности использования систем с машущим крылом для авиационных и морских приложений, устройств преобразования энергии ветра/моря, биоэлектромеханических систем поддержки жизнедеятельности организма человека.

В настоящее время разработка различных объектов с машущими крыльевыми элементами интенсивно проводится во многих исследовательских центрах США, Канады, России, Великобритании, Германии, Японии и других стран. Осуществляются крупные проекты, поддерживаемые на национальных уровнях и включающие в себя исследовательскую (теоретико-экспериментальную), технологическую и производственную программы. В середине 90-х гг. прошлого века оборонными агентствами были поддержаны программы, направленные на развитие исследований в области микролетательных аппаратов (MAV), в том числе

с машущим крылом. Цели исследования и разработок подобных систем – в первую очередь военные: сбор информации о противнике с воздуха, обследование районов боевых действий и др. Безусловно, существуют и гражданские области применения MAV – для служб полиции, спасения людей, контроля дорожного движения и государственной границы, мониторинга нефтегазопроводов и линий электроснабжения, контроля экологической обстановки и др.

Технические объекты с машущим крылом, перемещающиеся в воздушной среде

Летательные аппараты с машущим крылом – орнитоптеры – на сегодня могут быть разделены на две группы, отличающиеся в первую очередь геометрическими размерами:

- микролетательные аппараты (MAV);
- модели «средних» размеров, или полноразмерные орнитоптеры.

К первой группе относятся объекты размерами менее 6 дюймов, ко второй – летательные аппараты больших размеров. В первой группе может быть отдельно выделено направление, связанное с разработкой летательных аппаратов сантиметрового диапазона (с линейным размером менее дюйма). Такие аппараты получили название «микромеханические летающие насекомые» (MFI). Перечисленные системы пока находятся в стадии разработки. Сконструированные на сегодня MAV – однорежимные, обеспечивают весьма непродолжительное время пребывания в воздухе и имеют ограниченную «прикладную» функциональность. Но при этом не следует забывать, что это первые и весьма успешные шаги сделаны на принципиально новом и весьма перспективном технологическом уровне.

Позитивные тенденции, проявляющиеся в реализуемых проектах, показывают, что полноценные MAV с машущими крыльями могут появиться в ближайшем будущем. Обоснованность данного предположения подтверждают такие проекты, как «Robofly» (университет Беркли, рис.1), «Microbat» (разработка «AeroVironment», рис.2) и др. Следует отметить, что интерес к подобным разработкам подогревают также реальные перспективы использования MAV для исследования других планет (в частности Марса). Наряду с разработками MAV ведутся работы и по созданию полномасштабных орнитоптеров (моделей средних размеров). Начиная с



Рис.3. Полноразмерный орнитоуптер, университет Торонто

середины 90-х гг. в Аэрокосмическом университете Торонто продолжается разработка полноразмерного пилотируемого орнитоуптера, оснащенного двигателем, с размахом крыльев 41.2 фута (рис.3).

Технические объекты с машущим крылом, перемещающиеся в водной среде

Прогрессу в деле использования машущего движителя для технических объектов, функционирующих в водной среде, также способствуют оборонные агентства и исследовательские фонды. Интенсификация разработок подобных объектов ведется с начала 90-х гг. Причины активизации этих исследований во многом схожи с причинами исследований в области MAV – возможность использования различных модификаций необитаемых подводных аппаратов в военных целях – разведывательных, для мониторинга акваторий, обезвреживания морских мин, для антидиверсионных миссий и пр. Разработки подводных аппаратов с бионическими принципами движения также обосновываются отказом от использования морских животных в военных целях как негуманное и весьма дорогостоящее. Конечно, перспективны и коммерческие направления эксплуатации таких аппаратов при решении задач океанографии, гидрологии, промысловые цели и др.

Наибольшее внимание уделяется разработке AUV – полностью автономных подводных аппаратов. Основные системы AUV по функциональности схожи с аналогичными системами MAV. К ним добавляются специфические системы: балластная, дифференциальная, уравнительная.

Могут быть выделены два дополня-

ющих друг друга направления исследования:

- разработка рыбоподобных роботов, имеющих гибкую архитектуру системы «тело–стебель–плавник»;
- разработка аппаратов с жестким недеформируемым корпусом (телом) и машущим хвостовым/грудным плавником.

Известны разработки промежуточного вида – «жесткое тело–упругий стебель–машущий плавник».

Очевидно, что для воплощения концепции бионического AUV требуется комплексное решение задач гидродинамического дизайна объекта в целом и проектирования исполнительных устройств (actuators), обеспечивающих необходимые деформации тела и стебля, а также машущее движение плавника. Чисто механический привод для машущего крыла неэффективен для AUV, поэтому в настоящее время также исследуются возможности использования технологии искусственных мышц (Artificial Muscle Technology – AMT).

Нерешенность важной для AUV задачи энергоснабжения бор-

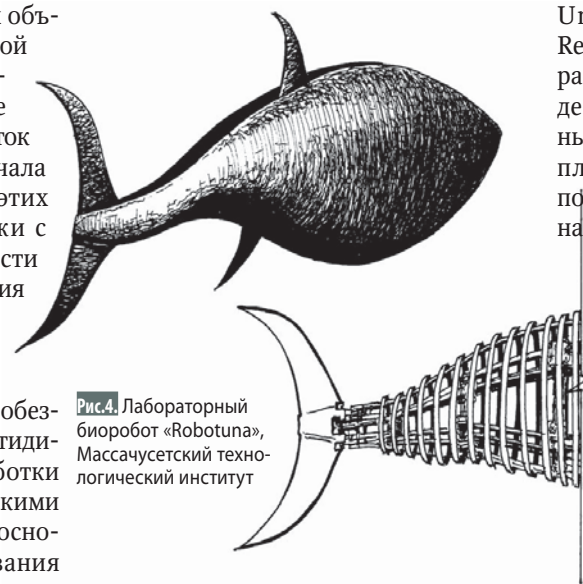


Рис.4. Лабораторный биоробот «Robotuna», Массачусетский технологический институт

товых систем сдерживает автономную эксплуатацию объекта. В связи с этим повышение энергетической эффективности всех блоков и систем является актуальной проблемой. Гидробионическая архитектура позволяет приблизиться к решению этой задачи, так как экспериментально показано, что использование пропульсивной системы в виде машущего крыла приводит к существенному уменьшению энергопотребления. Это подтверждают разработки и исследования механических прототипов рыб и китообразных. Ме-

ханизмы-роботы с гибкими корпусами используются как лабораторные средства передвижения для получения точных измерений сил на корпусе, для исследования процессов вихреобразования, генерируемого телом, стеблем и плавником; для исследования процессов быстрого старта и эффективного маневрирования.

Так, проект «Robotuna» (Массачусетский технологический университет) – лабораторный робот длиной 1.2 м в форме голубого тунца, состоящий из восьми независимо контролируемых звеньев (рис. 4) позволил сделать важные выводы, касающиеся объяснения парадокса Грея. Точные измерения сил на контролируемом гибком теле показали, что мощность, необходимая для движения активно плавающего тела, может быть сокращена более чем на 50% по сравнению с мощностью, необходимой для буксировки того же тела в недеформируемом состоянии. Эксперименты также подтвердили важную роль тела в организации вихревого потока, набегающего на плавник, приводящего к генерированию высоких значений пропульсивной силы.

Проекты «Blackbass Robot» (Tokai University), «PilotFish» («Nekton Research LLC») были посвящены разработке рыбоподобного аппарата с недеформируемым корпусом, оснащенным грудными (жесткими и упругими) плавниками для изучения вопросов позиционирования и маневрирования на малых скоростях хода. С точки зрения гидродинамики грудные плавники бионического AUV проектировались так, чтобы обеспечить поступательное и вращательное движение объекта относительно главных осей, малые радиусы разворота, прецизионную маневренность, точное позиционирование и устойчивость. Количество грудных плавников на объекте выбирается так, чтобы повреждение какого-либо плавника не влияло на функциональность AUV.

Безусловно, для обеспечения указанных свойств необходима разработка уникальной системы контроля и управления. Эта система должна быстро реагировать на дестабилизирующие силы и передавать управление на «актуаторы» соответствующих плавников. При этом должна предотвращаться приводящая к потере устойчивости перекомпенсация. Использование в качестве привода плавников искусственных мышц существенно сокращает число движущихся и вращающихся компонент привода, что позволяет конструктивно упростить

модуль «плавник–привод» и уменьшить акустическое излучение.

Таким образом, можно констатировать, что разработки бионических AUV успешно идут по направлениям адаптации гидродинамических свойств гидробионтов к техническим подводным системам: роботам с гибкой архитектурой, оснащенных системой грудных плавников; различным промежуточным решениям. Параллельно наблюдается процесс миниатюризации AUV.

Необходимо также отметить, что создание полноразмерных объектов для морской техники с машущим крылом – не столь большая проблема, как для авиации. Первые шаги по использованию машущего крыла на натуральных объектах уже сделаны. Построены подводные аппараты с плавниковым движительно-рулевым комплексом, например, по проектам СПбГМТУ (рис.5), американской компании «Lockheed Advanced Marine Systems» и др., а также надводные суда, оснащенные плавниковым движителем по проектам российской компании ЭКИП (рис.6), «Norwegian Fishing Industry Institute of Technology» и др. Эти суда, как и подводные аппараты, являются опытными образцами и еще не выпускаются серийно.

Заключение

Современные исследования показывают, что для достижения оптимальных эксплуатационных характеристик технического объекта с машущим крылом на различных режимах его функционирования необходим строгий контроль структуры (параметров) потока, отслеживание взаимосвязанных физических

характеристик сопротивления/тяги, подъемной силы, отрыва/присоединения потока, других тонких гидроаэродинамических факторов и управление ими. При этом очевидно, что эффективно контролировать движение мускулов можно только работу адаптивного крыла.

Данный процесс может осуществляться с помощью пассивных и активных стратегий, к которым относится изменение в процессе эксплуатации геометрических, упругих характеристик крыла, законов его движения и др.

Безусловно, последние достижения в области новых конструкционных материалов (включая технологию искусственных мускулов), микроэлектромеханических систем (MEMS), источников энергии и исполнительных устройств



Рис.5. Подводный аппарат «Афалина», приводимый в движение мускульной энергией человека, СПбГМТУ



Рис.6. Экспериментальное судно с крыльевой системой преобразования энергии морских волн, ЭКИП, Россия

открыли новые горизонты практического развития данного направления. Можно констатировать,

что проблема разработки адаптивного машущего крыла как для морских, так и для авиационных объектов (стандартных, микро-, нано-) остается на сегодня актуальной и вызывает повышенный интерес. Летящие и плавающие технические объекты с машущим крылом находятся в настоящее время на этапе разработки, однако сделаны очень важные «качественные» шаги на пути их создания. Опытные образцы микролетательных аппаратов третьего и четвертого поколений, а также модели плавающих биороботов свидетельствуют о прогрессе в развитии технологии и позволяют надеяться на появление полноценных технических объектов с машущим движителем уже в ближайшие пять–семь лет.

Литература

- Rozhdestvensky K.V. and Ryzhov V.A., **Aerodynamics of flapping-wing propulsors**// Progress in Aerospace Sciences, 2003, 39, p. 585–633.
Rozhdestvensky K.V. and Ryzhov V.A., **Flapping-wing propulsion**. – McGraw Hill Yearbook, 2005, p. 22–25.

МОТОСЕРВИС **Vetus**
г. Москва Дмитровское шоссе д.46 корп.2
www.mdiesel.ru
E-mail: mdiesel@dataforce.net

Оборудование **Vetus** и **MARITIM** в Москве
тел. (495)482-43-11 485-11-00 482-77-01 факс 481-69-00

Полный спектр оборудования для катеров, мотолодок, яхт
Двигатели Vetus, Mercury, Mercruiser
Сервисный центр по ремонту и обслуживанию двигателей.
Реверс-редукторы ZF, яхтенные колонки, дейдвуды, гребные винты, подруливающие устройства. Управление, контроль, навигация, светотехника. Якоря, цепи, лебедки, блоки, палубное оборудование, такелаж. Отопление, вентиляция, климат-контроль. Водоснабжение, сантехника, цистерны, насосы, шланги. Электрооборудование и гидравлика. Иллюминаторы, окна, люки.

www.interphase-tech.ru

NAVICOM
navigation & communication

ЦВЕТНЫЕ ЭХОЛОТЫ
ПЕРЕДНЕГО ОБЗОРА

INTERPHASE
Forward Looking Technology

Картплоттеры
GPS-приемники
Радары, эхолоты
Радиостанции
Электронная картография
Средства спутниковой связи

Тел.: (495) 786-6506, 730-2140
Факс: (495) 116-7511