

Rublev Viktor Pavlovich

Institute of Radio electronics, Information Science and Electrical Engineering, Vladivostok

E-mail: LAVR46@mail.ru

Fl. 85, 41, Neibuta St., Vladivostok, 690109, Russia, Ph.: +7(4232)290-591

УДК 532.5.032

В. А. Рыжов, С. В. Тарасов

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭКОЛОГИЧЕСКИ ЧИСТОГО ЭНЕРГОСБЕРЕГАЮЩЕГО ДВИЖИТЕЛЯ ТИПА МАШУЩЕЕ КРЫЛО

Работа посвящена численному моделированию обтекания пропульсивной системы с упругим машущим крыльевым элементом, применяемой для малых необитаемых подводных аппаратов. Анализируется влияние жесткости и других проектных параметров на тягу и пропульсивную эффективность движителя.

Машущее крыло; движитель; адаптивность; уравнения Навье-Стокса.

V.A. Ryzhov, S.V. Tarasov

MATHEMATICAL MODELIN OF ECOLOGICAL ENERGY-CONSERVING FLAPPING WING PROPULSOR

In this paper computational modeling of flapping-wing propulsors for autonomous underwater vehicles is considered. Effect of flexibility and other design parameters on average thrust and efficiency of the propulsor is analyzed.

Waves wing; moves; adaptability; equation Navje-Stoks.

Практические вопросы экологии, создания энергетически более экономичных и более эффективных подводных технических средств, интерес, проявляемый к автономным необитаемым микрообъектам, к системам преобразования энергии моря, ставят адаптивные движители бионического типа – упругие машущие крыльевые устройства – в один ряд с другими пропульсивными системами, которые могут быть использованы в этих целях.

Принципы, лежащие в основе подобных устройств, являются практическим продолжением идей, заложенных природой в живых объектах, прошедших огромный путь эволюционного развития. Тезис о том, что живой организм в результате эволюции наилучшим образом приспосабливается к своей среде обитания, подтвержден многочисленными биологическими исследованиями.

Можно констатировать, что с точки зрения учета особенностей гидродинамики биологических объектов для практической реализации важны следующие факторы:

- специфическая кинематика движения крыла (плавника),
- способность управления вихревыми структурами, сходящими с крыла (и тела) для обеспечения высоких пропульсивно-несущих показателей,
- способность использования энергии (вихревых структур) потока для повышения эффективности движения (например, перемещение в волновых, стратифицированных, возмущенных потоках; вблизи границ раздела сред; групповые перемещения),
- изменяемая геометрия и упругость крыла, подстраивающиеся под конкретный режим движения,
- существенные амплитуды колебаний и/или деформации крыла,

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

Существующие на сегодняшний день достижения в области создания малых подводных обитаемых аппаратов с машущим двигателем [9] говорят о перспективах их использования на практике. При помощи современных конструкционных материалов, микроэлектромеханических систем, источников и преобразователей энергии становится возможным получение уникальных гидроаэродинамических, акустических и экологических качеств, присущих гидробионтам.

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 и управление взаимосвязанными физическими характеристиками: сопротивлением/тягой, подъемной силой, отрывом/присоединением потока, другими тонкими гидроаэродинамическими факторами. При этом становится очевидным, что эффективный контроль и управление возможны только для адаптивного крыла. Данный процесс может осуществляться с помощью пассивных и активных стратегий, к которым относятся изменение в процессе эксплуатации геометрических, упругих характеристик крыла, законов его движения.

В частности, регулируемая упругость крыла практически реализуема и имеет все шансы на внедрение на технических объектах. Упругость крыла позволяет затянуть точку отрыва и расширить диапазон эффективных углов атаки, при которых гидродинамические характеристики будут сохранять высокие значения. Крылья с регулируемой упругостью целесообразно применять на многорежимных технических объектах.

При использовании крыльев с регулируемой упругостью в качестве двигателей резонансного типа облегчается задача настройки двигателя на резонанс.

Настоящая работа имеет своей целью исследование влияния упругости и других проектных параметров на пропульсивные характеристики машущего двигателя с использованием разработанного в СПбГМТУ программного кода SmartFlow [2,3,8], предназначенного для расчета нестационарных течений вязкой несжимаемой жидкости.

1. Постановка задачи

Рассматривается нестационарное двумерное обтекание упругого профиля, совершающего вертикально-угловые колебания в набегающем потоке вязкой несжимаемой жидкости.

При записи выражений все величины обезразмериваются по длине хорды профиля c , скорости потока на бесконечности U_∞ и плотности жидкости ρ .

Характеристическими параметрами задачи являются число Рейнольдса Re , число Струхала St и обезразмеренная жесткость профиля λ , определяемые следующим образом

$$Re = U_\infty c / \nu, \quad St = 2h_0 f / U_\infty, \quad \lambda = 2K / (\rho U_\infty^2 c^3),$$

где ν – кинематическая вязкость жидкости, h_0 – амплитуда вертикальных колебаний профиля, f – частота колебаний, $K = EI$ – жесткость упругого профиля, E – модуль Юнга материала профиля, I – момент инерции поперечного сечения.

2. Метод решения

Предлагаемый метод, реализованный в виде программного кода SmartFlow [2], основывается на решении уравнений Навье – Стокса, замкнутых при помощи модели турбулентности Спаларта – Аллмараса. Для пространственной дискретизации определяющих уравнений применяется метод конечных объемов на гибридных неструктурированных сетках. Возможность решения задач с подвижными границами обеспечивается за счет применения Лагранжево – Эйлера подхода (ALE).

2.1. Определяющие уравнения

В качестве математической модели течения выбраны нестационарные уравнения Навье – Стокса с искусственной сжимаемостью.

Моделирование турбулентности может осуществляться как при помощи метода моделирования крупных вихрей (LES) с моделью внутрисеточных напряжений Смагоринского, так и на основе осредненных по Рейнольдсу уравнений Навье – Стокса (RANS), замкнутых моделью турбулентности Спаларта – Аллмараса [10].

Уравнение неразрывности записывается с учетом параметра искусственной сжимаемости, что позволяет избежать возникновения неустойчивости решения при наложении условия несжимаемости. Обезразмеренные определяющие уравнения имеют вид

$$\begin{aligned} \frac{\partial p}{\partial t} + \beta^2 \nabla \cdot \bar{u} &= 0, \\ \frac{\partial \bar{u}}{\partial t} + \nabla \cdot (\bar{u} \cdot \bar{u}) &= -\nabla p + \nabla \cdot \left[\left(\frac{1}{Re} + \nu_t \right) \nabla \bar{u} \right], \end{aligned}$$

где $\bar{u} = (u, v)$ – вектор скорости потока, β – параметр искусственной сжимаемости, ν_t – турбулентная вязкость жидкости.

2.2. Метод деформации подвижной расчетной сетки путем отображения на граф Делоне

Для решения задач в областях с подвижной границей в работе применяется метод подвижных сеток. В предлагаемом методе расчетная сетка строится таким образом, чтобы границы ячеек совпадали с границами расчетной области. По мере колебаний профиля, сетка деформируется, повторяя движение контура профиля, причем топология сетки остается неизменной. Тем самым наложение граничных условий осуществляется с высокой точностью.

Для определения положения всех точек сетки по известным координатам точек, лежащих на подвижной границе расчетной области, применяется метод отображения на граф Делоне расчетной области [6]. При этом для совокупности точек, лежащих на границе расчетной области, строится граф Делоне. Координаты точек деформированной сетки вычисляются по координатам граничных точек, являющихся вершинами графа Делоне.

2.3. ALE- формулировка метода конечных объемов

Пространственная дискретизация определяющих уравнений осуществляется методом конечных объемов. Используются совмещенный тип сетки, т.е. контрольный объем соответствует ячейке сетки. Предлагаемый метод позволяет работать с гибридными неструктурированными сетками, содержащими ячейки различной формы: треугольные, четырехугольные и др.

Уравнения метода конечных объемов на подвижной сетке формируются при помощи Лагранжево–Эйлерова (ALE) подхода [5]. При этом законы сохранения записываются в системе отсчета, связанной с движущейся сеткой.

Интегральная форма уравнений, записанная для контрольной ячейки S , граница которой перемещается с заданной скоростью, имеет вид

$$\int_S \frac{\partial \rho}{\partial t} dS + \beta^2 \int_L [(\vec{u} - u_g) \cdot \vec{n}] dl = 0,$$

$$\int_S \frac{\partial \rho}{\partial t} dS + \int_L [(\vec{u} - u_g) \cdot \vec{n}] + p \vec{n} dl = \left(\frac{1}{\text{Re}} + \nu_t \right) \int_L (\nabla \vec{u} \cdot \vec{n}) dl,$$

где $\vec{u}_g = (u_g, v_g)$ – вектор скорости движения границы ячейки.

2.4. Метод двойных шагов по времени

Для расчета нестационарного течения методом искусственной сжимаемости применяется техника двойных шагов по времени (dual time stepping) [7].

При использовании метода искусственной сжимаемости, в уравнение неразрывности включается слагаемое, содержащее производную давления по искусственному времени. Дискретизация производных по физическому времени осуществляется при помощи неявной схемы второго порядка точности. При этом на каждом шаге физического времени осуществляется итерационный процесс интегрирования по искусственному времени при помощи неявной схемы первого порядка. Таким образом, обеспечивается выполнение условия несжимаемости на каждом шаге физического времени.

2.5. Расчет упругой деформации профиля

Деформированное состояние упругой пластины под воздействием гидродинамических сил определяется на основе геометрически нелинейной модели теории упругости. Для этого используются уравнения двумерной сильной деформации бесконечно длинной полосы [1] при отсутствии ограничений на величину углов поворота, дискретизированные методом конечных объемов.

Принимая условие малости деформаций растяжения и сдвига по сравнению с углами поворота пластины и пренебрегая растяжением срединного слоя пластины в направлении хорды, изгибающий момент, действующий в поперечном сечении пластины, можно выразить как $M(x) = -K \partial \theta / \partial x$, где θ – угол поворота срединного слоя пластины, $K = Eb^3/12$ – жесткость упругой пластины.

2.6. Пропульсивные характеристики машущего крыла

Проекция сил вязкости X_v, Y_v и давления X_p, Y_p , действующих в каждой точке поверхности обтекаемого тела, на оси координат имеют вид

$$X_v = \rho v \frac{\partial u_\tau}{\partial n} n_y, Y_v = -\rho v \frac{\partial u_\tau}{\partial n} n_x, X_p = -pn_x, Y_p = -pn_y,$$

где n_x, n_y – координаты внешней нормали к поверхности тела, u_τ – тангенциальная составляющая скорости.

Коэффициенты сопротивления, подъемной силы, обезразмеренные по динамическому напору свободного потока, вычисляются путем интегрирования сил вязкости и давления по поверхности обтекаемого тела:

$$C_d = \frac{2}{\rho U_\infty^2 c} \int_S (X_v + X_p) dS, \quad C_l = \frac{2}{\rho U_\infty^2 c} \int_S (Y_v + Y_p) dS.$$

Пропульсивные характеристики машущего крыла определяются мгновенными и средними за период T коэффициентами тяги, мощности, затраченной на поддержание колебаний, и пропульсивной эффективностью движителя. Эти коэффициенты вычисляются следующим образом:

- мгновенный C_T и средний за период $\langle C_T \rangle$ коэффициенты тяги:

$$C_T = -C_d, \quad \langle C_T \rangle = \frac{1}{T} \int_0^T C_T dt,$$

- мгновенный C_p и средний за период $\langle C_p \rangle$ коэффициенты затраченной на поддержание колебания мощности:

$$C_p = -\frac{C_l}{U_\infty} \frac{\partial h}{\partial t}, \quad \langle C_p \rangle = \frac{1}{T} \int_0^T C_p dt,$$

- пропульсивная эффективность движителя:

$$\eta = \langle C_T \rangle / \langle C_p \rangle.$$

3. Анализ расчетных результатов

Численное исследование влияния упругости на пропульсивные характеристики обтекания колеблющегося крыла было осуществлено для конфигурации, показанной на рис. 1, при значениях проектных параметров, соответствующих принятым в экспериментальной работе [4].

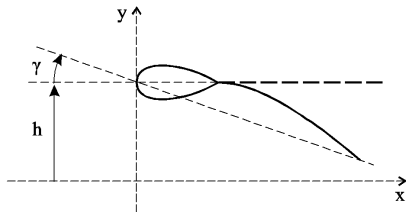


Рис. 1. Схема колебаний конфигурации жесткого профиля с упругой пластиной

Расчеты производились при помощи программного кода SmartFlow [2,3,8]. Построение применявшейся для расчетов гибридной неструктурированной сетки было осуществлено так же, как и в работе [8]. Вблизи обтекаемого тела генерировалась сетка из четырехугольников вытянутой формы, а остальная часть расчетной области заполнялась неструктурированной треугольной сеткой.

Рассматривается нестационарное обтекание конфигурации, совершающей вертикальные колебания в набегающем потоке неограниченной жидкости. Конфигурация состоит из жесткого элемента, имеющего форму профиля NACA 0030 с хордой $c/3$, а также упругой плоской пластины с хордой $2/3c$, толщиной b , прикрепленной к задней кромке жесткого элемента.

Вертикальные колебания определяются законом $h(t) = h_0 \cos(\omega t)$, где h_0 – амплитуда, $\omega = 2\pi f$ – круговая частота, f – частота вертикальных колебаний.

Значение числа Рейнольдса – $Re = 9 \cdot 10^3$, амплитуда вертикальных колебаний – $h_0/c = 0,195$, безразмерный модуль Юнга материала пластины – $E/(\rho U^2) = 2,05 \cdot 10^{10}$.

Были проведены серии расчетов для значений относительной толщины пластины в диапазоне $b/c = \{0,84 \cdot 10^{-3}, \dots, 4,23 \cdot 10^{-3}\}$, что соответствует значениям

обезразмеренной жесткости $\lambda = \{1.0, \dots, 125, 0\}$ и чисел Струхала St в диапазоне $\{0, 1, \dots, 0, 8\}$.

Результаты численных расчетов сравниваются с экспериментальными данными работы [4] на рис. 2 – 4.

Зависимости коэффициента средней тяги $\langle C_T \rangle$ от числа Струхала St для различных значений относительной толщины пластины b/c приводятся на рис. 2. Причем на графиках отобразена величина $\langle C_T \rangle / St^2$, что повышает наглядность, так как тяга $\langle C_T \rangle$ сама по себе быстро растет с увеличением числа Струхала. Из графиков видно, что имеется экстремум по тяге, который смещается в область более высоких чисел Струхала при увеличении жесткости пластины. Таким образом, при малых частотах тяга оказывается выше для менее жесткой пластины. Кроме того, переход от сопротивления к тяге по мере роста числа Струхала происходит раньше для меньших значений жесткости.

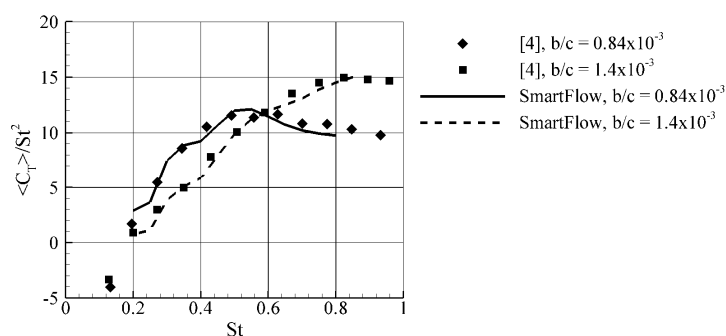


Рис. 2. Зависимость коэффициента средней тяги $\langle C_T \rangle / St^2$ от числа Струхала St при $Re = 9 \cdot 10^3$, $h_0/c = 0,195$

На рис. 3 построена зависимость коэффициента средней тяги $\langle C_T \rangle / St^2$ от относительной толщины пластины b/c , которая демонстрирует наличие экстремума по тяге.

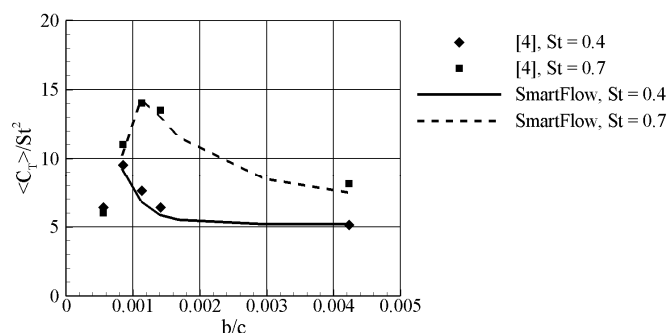


Рис. 3. Зависимость коэффициента средней тяги $\langle C_T \rangle / St^2$ от относительной толщины пластины b/c при $Re = 9 \cdot 10^3$, $h_0/c = 0,195$

На рис. 4 показана зависимость пропульсивной эффективности η от числа Струхала St для различных значений λ . Данная зависимость свидетельствует о том, что пропульсивная эффективность оказывается значительно выше для случая меньшей жесткости. Имеется экстремум по пропульсивной эффективности, который также смещается в область более высоких частот при повышении жесткости.

Таким образом, наряду с увеличением тяги, меньшая жесткость пластины дает преимущество по эффективности.

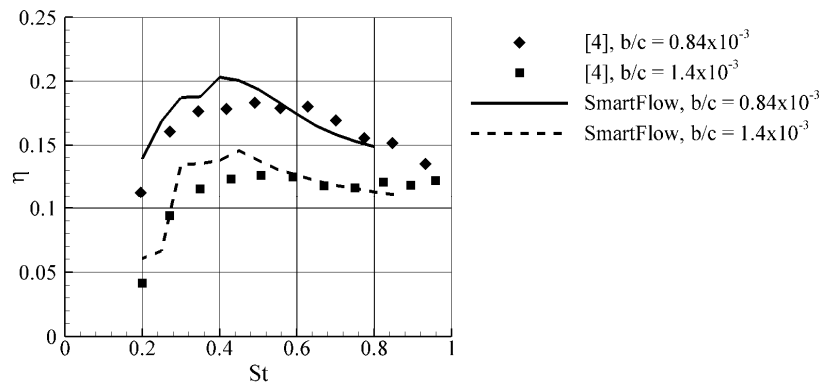


Рис. 4. Зависимость пропульсивной эффективности η от числа Струхала St при $Re = 9 \cdot 10^3$, $h_0/c = 0,195$

Заключение

В настоящей работе осуществлено численное исследование влияния упругости на тягу и пропульсивную эффективность упругого профиля, совершающего вертикальные колебания в набегающем потоке.

Предлагаемый метод, предназначенный для расчета нестационарного обтекания упругих профилей, колеблющихся в потоке вязкой несжимаемой жидкости, реализован в виде программного кода SmartFlow [2,3,8]. В развитие данного метода в настоящей работе реализована модель упругой деформации профиля и применена техника деформации расчетной сетки при помощи отображения на граф Делоне.

Исследование показало, что зависимость средней тяги от числа Струхала имеет экстремум, который смещается в область более высоких частот при увеличении жесткости пластины. Также выявлен экстремум для зависимости средней тяги от жесткости профиля.

Для зависимости пропульсивной эффективности от числа Струхала имеется экстремум, который также смещается в область более высоких частот при повышении жесткости. Пропульсивная эффективность оказывается значительно выше при оптимальной жесткости профиля.

Таким образом, упругость профиля обеспечивает лучшие пропульсивные характеристики по сравнению с жестким машущим крылом – двигателем. Изменяемая упругость позволяет настроить двигатель на режим, оптимальный для текущего числа Рейнольдса.

Полученные зависимости показали удовлетворительное согласование с известными экспериментальными данными [4], что свидетельствует о возможности применения разработанного метода и программного кода в качестве инструмента

численного моделирования адаптивного машущего движителя на начальных стадиях проектирования.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Новожиллов В.В.* Основы нелинейной теории упругости. – М.: ГИТТЛ, 1948.
2. *Рыжов В.А., Тарасов С.В.* Метод численного расчета течений вязкой жидкости с использованием осредненных по Рейнольдсу уравнений Навье-Стокса // Тезисы докладов научно-технической конференции "XLII Крыловские чтения". – СПб., 2006. – С. 17–19.
3. *Рыжов В.А., Тарасов С.В.* Численное моделирование обтекания движителя типа машущее крыло // Наука и технологии: Труды XXVII Российской школы, посвященной 150-летию К.Э. Циолковского, 100-летию С.П. Королева и 60-летию Государственного ракетного центра "КБ им. академика В.П. Макеева". – М.: РАН, 2007.
4. *Heathcote S., Gursul I.* Flexible Flapping Airfoil Propulsion at Low Reynolds Numbers // AIAA Journal. 2007. Vol. 45. – P.1066–1079.
5. *Hirt C.W., Amsden A.A., Cook J. L.* An arbitrary lagrangian-eulerian computing method for all flow speeds // Journal of Computational Physics. 1974. Vol. 14. – P. 227–253.
6. *Liu X., Qin N., Xia H.* Fast dynamic grid deformation based on Delaunay graph mapping // Journal of Computational Physics. 2006. Vol.221. – P. 405–423.
7. *Peyret R.* Unsteady evolution of a horizontal jet in a stratified fluid // Journal of Fluid Mechanics. 1978. Vol. 27. – P. 49–63.
8. *Ryzhov V.A., Tarasov S.V.* Computational study of flapping airfoil hydrodynamics // International Conference "SubSeaTech'2007". Saint Petersburg, 2007.
9. *Rozhdestvensky K.V., Ryzhov V.A.* Aerohydrodynamics of flapping-wing propulsors // Progress in Aerospace Sciences. 2003. Vol. 39. – P. 585–633.
10. *Spalart P.R., Allmaras S.R.* A One Equation Turbulence Model for Aerodynamic Flows. AIAA Paper 92–439. 1992.

Рыжов Владимир Александрович

Санкт-Петербургский государственный морской технический университет

E-mail: ryzhov@hermitage.ru

190068, Россия, Санкт-Петербург, наб. канала Грибоедова, д.74, кВ. 24

Тел.: 8(812) 952-77-19

Тарасов Сергей Владимирович

E-mail: sergey_tarasov@inbox.ru

Ryzhov Vladimir Aleksandrovich

Saint Petersburg State Marine Technical University

E-mail: ryzhov@hermitage.ru

74, Naberezhnaya Kanala Griboedova, apt. 24, St. Petersburg, 190068, Russia

Ph.: 8(812) 952-77-19

Tarasov Sergey Vladimirovich

E-mail: sergey_tarasov@inbox.ru