

УДК 533

ДВИЖИТЕЛЬ ТИПА МАШУЩЕГО КРЫЛА

Д. Н. Горелов

Омский филиал Института математики СО РАН, 644043 Омск, Россия

E-mail: gorelov@ofim.oscsbras.ru

Обсуждаются проблемы, связанные с разработкой движителя типа машущего крыла. Исследуются особенности нестационарного обтекания крыла, влияние его геометрических параметров и закона колебаний на силу тяги и гидродинамический коэффициент полезного действия, предложены формулы для расчета силы тяги при больших значениях числа Струхала, рассмотрены некоторые схемы движителя и их возможное применение.

Ключевые слова: машущее крыло, нестационарное обтекание крыла, сила тяги, движитель типа машущего крыла.

Машущее крыло является одним из главных природных движителей. Им оснащены большинство аэро- и гидробионтов. Такой движитель позволяет достигать высокой скорости движения при относительно малом расходе биологического топлива. Например, птицы во время миграционного перелета над океаном преодолевают без отдыха огромные расстояния с малой потерей своей массы. А рыба-меч может двигаться со скоростью до 130 км/ч. Интерес к исследованию полета аэробиионтов и плавания гидробионтов с большими скоростями возник давно, однако решить эти задачи удалось лишь в XX в. Решающую роль в понимании механизма образования силы тяги сыграла теория крыла в нестационарном потоке. В первой половине XX в. была построена линейная теория, а во второй его половине начала создаваться нелинейная теория. Наиболее результативной оказалась линейная теория, которая позволила получить точные решения ряда задач о нестационарном обтекании крыла.

В настоящее время имеется большое количество работ, посвященных теоретическому и экспериментальному исследованию гидродинамики машущего крыла. Однако на практике результаты этих исследований применяются редко, видимо, вследствие их малой доступности и разрозненности публикаций, затрудняющих общее представление о проблеме и ее понимание. Поэтому важной задачей является изложение известных результатов и предложений по их применению в доступной форме. Решению этой задачи посвящена настоящая работа.

1. Машущее крыло создает силу тяги только в нестационарном потоке, который возникает либо при колебаниях самого крыла, либо при пульсациях жидкости вблизи него. В таком потоке гидродинамическое давление на крыло зависит как от перемещения крыла (жидкости), так и от скорости этого перемещения. Мерой нестационарности течения жидкости вокруг крыла является число Струхала $k = \omega b/V$ (ω — круговая частота колебаний жидкости; b — хорда крыла; V — скорость набегающего потока). Значение $k = 0$ соответствует стационарному течению, $k = \infty$ — колебаниям крыла в “покоящейся” жидкости.

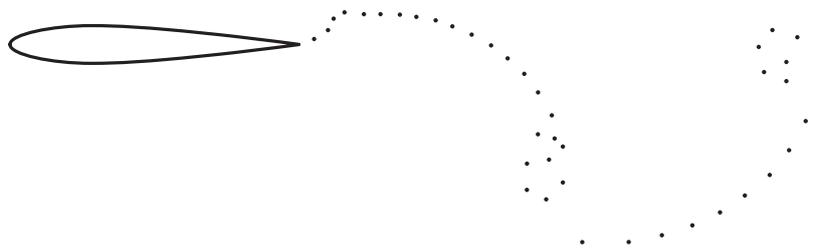


Рис. 1. Вихревой след (точки) за профилем, полученный в результате расчета

Особенностью рассматриваемого нестационарного течения является образование вихревых следов, сходящих с крыла. Основными источниками вихрей в следе являются пограничный слой на крыле, изменение с течением времени циркуляции скорости вокруг каждого поперечного сечения крыла и изменение циркуляции скорости вдоль размаха крыла. Каждая из этих составляющих вихревого следа оказывает различное влияние на силу тяги колеблющегося крыла. Изменение циркуляции вдоль размаха уменьшает силу тяги, так как порождает индуктивное сопротивление, исследованное в работе [1]. Изменение циркуляции скорости по времени создает вихревые следы, влияние которых исследуется в теории крыла в нестационарном потоке [2–5]. Согласно данной теории такой вихревой след может создавать силу тяги на колеблющемся крыле. Влияние вязкой составляющей вихревого следа, порождаемой пограничным слоем, на величину силы тяги изучено недостаточно. На поверхности крыла вязкая жидкость создает силу трения, которая уменьшает силу тяги.

Имеющиеся теоретические и экспериментальные данные показывают, что основным фактором, определяющим силу тяги на колеблющемся крыле, является изменение циркуляции скорости вокруг крыла с течением времени. Также из теории следует, что сила тяги может возникать только при наличии вихревого следа. Данный вывод, в частности, следует из работы [6], в которой рассматривается плоское нестационарное течение жидкости вокруг крыла с постоянной циркуляцией скорости при отсутствии вихревых следов.

Вихревые следы за машущим крылом исследовались в работе [7], в которой установлено, что в крайних положениях крыла, когда меняется направление его движения, с крыла сходят вихревые ядра, образующие за ним дорожку типа дорожки Кармана. Однако в вихревых ядрах жидкость вращается в направлении, противоположном направлению вращения в дорожке Кармана. Поэтому такая система вихрей порождает силу тяги, а не силу сопротивления. Детальная визуализация вихревых следов за колеблющимся крылом при различных значениях числа Струхалия выполнена в работе [8]. Сравнение формы вихревых следов, полученных путем расчета по нелинейной теории крыла, с экспериментальными данными [8] показало, что они практически совпадают. Типичная форма вихревого следа за колеблющимся крылом в плоском потоке приведена на рис. 1.

2. Важной характеристикой движителя является его гидродинамический коэффициент полезного действия η . Для движителя типа машущего крыла этот коэффициент определяется отношением полезной мощности $R_T V$ к мощности N , затрачиваемой на колебания крыла: $\eta = R_T V / N$, где R_T — сила тяги; V — скорость поступательного движения крыла; N — мощность, определяемая без учета механических потерь в конструкции движителя. Как правило, в качестве коэффициента полезного действия рассматривается среднее значение η за период колебаний.

У природных движителей коэффициент η может принимать значения, близкие к единице. По наблюдениям исследователей, такие высокие значения гидродинамического коэффициента полезного действия достигаются в режимах полета и плавания при числах Струхалия $k \ll 1$. Этот вывод соответствует теории крыла в нестационарном потоке [2, 3].

Условия создания силы тяги у аэро- и гидробионтов различны. Крылья аэробиионтов помимо силы тяги должны развивать подъемную силу, тогда как для движения гидробионтов достаточно лишь силы тяги, поэтому геометрические характеристики крыльев и законы их колебаний у аэробиионтов и гидробионтов различны. Например, у птиц поперечные сечения крыла имеют изогнутый профиль, что позволяет увеличить подъемную силу, тогда как у гидробионтов профили поперечного сечения плавников симметричны. Симметричность профиля плавников у гидробионтов обусловлена тем, что при одинаковых условиях кривизна профиля крыла и установка его под некоторым углом атаки снижают силу тяги. Однако общим остается резонансный режим колебаний, в котором мощность, затрачиваемая на поддержание колебаний крыльев, минимальна. У природных движителей режим резонанса устанавливается путем саморегуляции форм колебаний упругого крыла, имеющего сложную систему упругих элементов. В технических устройствах построение такой системы затруднительно. Влияние упругих деформаций крыла на коэффициент полезного действия практически не исследовано. Имеются лишь отдельные результаты, полученные на основе линейной теории крыла. Экспериментальные исследования ограничиваются, как правило, испытаниями моделей жесткого крыла. В этих испытаниях для коэффициента η получены значения $\eta \leq 0,7$ [9].

Существенное влияние на значение коэффициента η оказывают закон колебаний крыла и число Струхала. В случае машущих колебаний $\eta > 0$ при всех значениях числа Струхала k , в случае крутильных колебаний $\eta > 0$ лишь при достаточно больших значениях k [2, 3]. Гидродинамический коэффициент полезного действия может существенно зависеть и от других параметров включая амплитуду колебаний, форму крыла и относительную толщину его профиля, однако это влияние изучено недостаточно.

3. Выражение для силы тяги $R_T(t)$, действующей на колеблющееся крыло, можно представить в виде

$$R_T(t) = \bar{R}_T + \Delta R_T(t), \quad (1)$$

где \bar{R}_T — среднее значение силы тяги за период колебаний; $\Delta R_T(t)$ — ее пульсационная составляющая.

В общем случае сила тяги сложным образом зависит от закона колебаний крыла, его геометрических характеристик и физических свойств окружающей среды. Поэтому целесообразно ограничиться рассмотрением более простой модели движителя, представляющей практический интерес. В качестве такой модели выберем прямоугольное крыло с симметричным профилем, колеблющееся в несжимаемой жидкости. Пусть это крыло совершает поступательно-крутильные колебания по закону (рис. 2)

$$w(x, t) = y(t) + (x - x_0)\alpha(t), \quad y(t) = y_0 \cos(\omega t + \mu), \quad \alpha(t) = \alpha_0 \cos \omega t, \quad (2)$$

где $w(x, t)$ — перемещение точек крыла; μ — сдвиг фазы между поступательными и крутильными колебаниями.

Предположим, что средой является вода, нестационарное движение которой происходит при больших значениях числа Струхала $k \gg 1$ (при колебаниях крыла в воде этот режим представляет наибольший интерес).

Для оценки силы тяги применим линейную теорию крыла в плоском нестационарном потоке [2, 3]. Тогда для рассматриваемого закона колебаний (2) среднюю и пульсационную составляющие силы тяги в первом приближении можно вычислить по формулам

$$\begin{aligned} \bar{R}_T &= \frac{\pi}{8} \rho S (b\omega)^2 \left[\left(\frac{y_0}{b} \right)^2 - 2\alpha_0 \frac{y_0}{b} \left(\frac{3}{4} - \frac{x_0}{b} \right) \cos \mu + \alpha_0^2 \left(\frac{3}{4} - \frac{x_0}{b} \right)^2 \right], \\ \Delta R_T(t) &= \bar{R}_T \cos(2\omega t + \pi), \quad R_T(t) = \bar{R}_T [1 + \cos(2\omega t + \pi)]. \end{aligned} \quad (3)$$

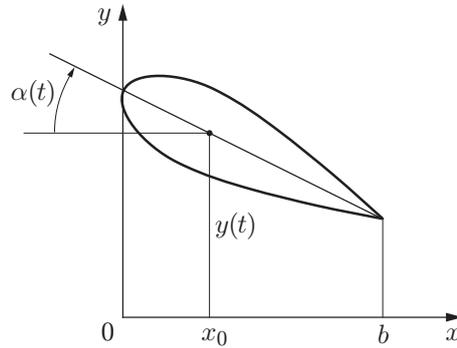


Рис. 2. Схема колебаний крыла

Здесь ρ — плотность жидкости; S — площадь крыла. Из соотношений (3) следует, что сила тяги $R_T(t)$ пульсирует с удвоенной частотой колебаний крыла, меняясь от нуля до максимального значения $2\bar{R}_T$.

При только поступательных колебаниях

$$\bar{R}_{Ty} = (\pi/8)\rho S(b\omega)^2(y_0/b)^2, \tag{4}$$

при только крутильных

$$\bar{R}_{T\alpha} = (\pi/8)\rho S(b\omega)^2\alpha_0^2(3/4 - x_0/b)^2. \tag{5}$$

При фиксированном значении амплитуды крутильных колебаний ($\alpha_0 = \text{const}$) сила тяги $\bar{R}_{T\alpha}$ увеличивается, если ось вращения перемещается вперед. Однако при этом увеличивается максимальное отклонение крыла от среднего положения $w_{\max} = \max |w(b, t)|$, что может привести к отрыву потока. Если фиксировать максимальное отклонение крыла, то при $x_0/b \rightarrow -\infty$ $\bar{R}_{T\alpha} \rightarrow \bar{R}_{Ty}$, $y_0 = w_{\max}$.

Пусть $x_0/b < 0$. Тогда при поступательно-крутильных колебаниях для сдвига фаз $\mu = \pi$ сила тяги \bar{R}_T принимает максимальное значение

$$\max \bar{R}_T = \bar{R}_{Ty} \left[1 + \frac{b\alpha_0}{y_0} \left(\frac{3}{4} - \frac{x_0}{b} \right) \right]^2. \tag{6}$$

В соответствии с формулами (3)–(6) сила тяги пропорциональна квадрату частоты колебаний. Поэтому частота колебаний является главным резервом увеличения силы тяги. В реальных условиях амплитуды и частота колебаний ограничены отрывом потока с поверхности крыла. Для крутильных колебаний таким ограничением является, видимо, значение $\alpha_0 < 0,25$, а для поступательных колебаний — $y_0 < b$. Естественно, что эти предельные амплитуды зависят от частоты колебаний, увеличение которой приводит к уменьшению предельных амплитуд.

С учетом сделанных замечаний оценим возможные значения силы тяги при поступательных, крутильных и поступательно-крутильных колебаниях крыла со сдвигом фазы $\mu = \pi$. Расчет проведем по формулам (1)–(6) для прямоугольного крыла с хордой $b = 0,5$ м, размахом $l = 1$ м, колеблющегося с круговой частотой $\omega = 30$ рад/с в воде, имеющей плотность $\rho = 10^3$ кг/м³. В результате получаем:

- для поступательных колебаний ($y_0/b = 0,5$) $\bar{R}_{Ty} = 11 \cdot 10^3$ Н;
- для крутильных колебаний ($\alpha_0 = 0,25$, $x_0 = -0,25$) $\bar{R}_{T\alpha} = 2,75 \cdot 10^3$ Н;
- для поступательно-крутильных колебаний со сдвигом фазы $\mu = \pi$ $\bar{R}_T = 25 \cdot 10^3$ Н.

При аналогичных колебаниях крыла в воздухе сила тяги уменьшается в 800 раз. Из выражения (5) следует, что такие же значения имеют соответствующие пульсационные составляющие силы тяги.

Приведенные примеры показывают, что для движителя типа машущего крыла целесообразно выбирать поступательные или поступательно-крутильные колебания крыла, так как крутильные колебания малоэффективны.

Для проектирования движителя необходимо знать не только силу тяги, но и подъемную силу $R_y(t) = R_{y1}(t) + R_{y2}(t)$, действующую на колеблющееся крыло. Эта сила имеет две составляющие, одна из которых $R_{y1}(t)$ зависит от перемещения крыла w и скорости перемещения \dot{w} , а другая $R_{y2}(t)$ — от ускорения \ddot{w} . Определим $R_{y1}(t)$, $R_{y2}(t)$ для случая поступательных колебаний на режимах $k \gg 1$. В соответствии с линейной теорией крыла [2, 3] имеем

$$R_{y1}(t) = -(\pi/2)\rho S(b\omega)V(y_0/b) \sin(\omega t); \quad (7)$$

$$R_{y2}(t) = (\pi/4)\rho S(b\omega)^2(y_0/b) \cos(\omega t). \quad (8)$$

Из соотношений (7), (8) следует, что подъемная сила $R_y(t)$ пульсирует с частотой, равной частоте колебаний крыла.

Представляет интерес расчет гидродинамического коэффициента полезного действия η при поступательных колебаниях крыла для чисел Струхала $k \gg 1$. В этом случае средняя за период колебаний T полезная мощность равна $\bar{R}_{Ty}V$, а средняя затраченная мощность равна

$$N_y = N_{y1} = \frac{1}{T} \int_0^T R_{y1}(t)\dot{w}(t) dt = \frac{\pi}{4} \rho S(b\omega)^2 V \left(\frac{y_0}{b}\right)^2.$$

Отсюда с учетом формулы (4) для коэффициента η получаем значение $\eta = 0,5$. При $k \rightarrow \infty$ такое же значение коэффициента η линейная теория дает и для других законов колебаний крыла в плоском потоке. Однако данный результат имеет место только в случае идеальной активной механической системы, способной полностью аккумулировать и отдавать энергию. Реальная конструкция движителя не обладает такими свойствами. Поэтому движителю требуется дополнительная мощность для перемещения жидкости. Для пассивной конструкции, не способной аккумулировать энергию, средняя дополнительная мощность равна

$$N_{y2} = \frac{1}{T} \int_0^T |R_{y2}(t)| |\dot{w}(t)| dt = \frac{\pi}{4} \rho S(b\omega)^3 V \left(\frac{y_0}{b}\right)^2.$$

В результате для пассивной механической системы с крыльями, колеблющимися поступательно при числах Струхала $k \gg 1$, имеем

$$\eta = \frac{\bar{R}_{Ty}V}{N_{y1} + N_{y2}} = \frac{1}{2} \frac{\pi}{\pi + k}. \quad (9)$$

Из формулы (9) следует, что при $k \rightarrow \infty$ (для ограниченной частоты колебаний крыла это соответствует $V \rightarrow 0$) гидродинамический коэффициент $\eta \rightarrow 0$.

4. Высокая частота пульсаций гидродинамических сил оказывает существенное влияние на устойчивость движения и управляемость плавучего средства с движителем типа машущего крыла. Наибольшую опасность представляют пульсации подъемной силы. Их можно практически устранить, если конструкция движителя будет содержать два крыла, колеблющиеся в противофазе. Возможные варианты таких схем движителя представлены на рис. 3.

Варианту 1 соответствуют два крыла, колеблющиеся в противофазе. В этом случае суммарная подъемная сила равна нулю, а сила тяги удваивается. В варианте 2 второе

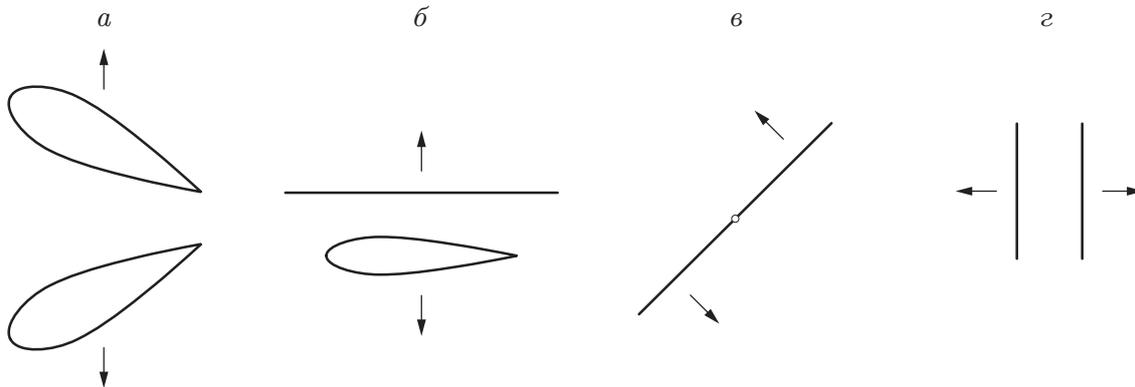


Рис. 3. Возможные схемы движителя:

a-z — варианты 1–4 соответственно; стрелки — направления подъемных сил, действующих на крылья, при их движении в противоположном направлении

крыло заменено плоским экраном, и суммарная подъемная сила, действующая на систему крыло — экран, вновь равна нулю, а сила тяги создается лишь одним крылом. В варианте 3 крыло совершает крутильные колебания с заданной амплитудой вокруг оси, расположенной посередине крыла вдоль его хорд. На такое крыло действуют сила тяги и пульсирующий крутящий момент относительно оси вращения. Вариант 4 является частным случаем варианта 1. Он представляет интерес при вертикальном (относительно поверхности воды) размещении крыльев. В этом случае влияние свободной поверхности воды минимально, а верхняя часть крыльев может даже выступать из воды. Во всех вариантах на конструкцию движителя оказывает действие пульсирующая сила тяги.

Наиболее перспективным представляется применение машущего крыла в качестве движителя для речных судов с двумя корпусами. В этом случае особый интерес представляют небольшие суда, предназначенные для плавания по малым рекам. Такие реки мелководны и имеют узкий извилистый фарватер, что затрудняет плавание по ним обычных судов. Предварительный анализ показал, что движитель типа машущего крыла может эффективно работать в условиях предельного мелководья. Кроме того, установка движителя на подвижной платформе позволяет менять направление вектора силы тяги, что обеспечивает высокую маневренность судна. При этом исчезает необходимость в установке рулевого устройства. Величину силы тяги целесообразно изменять, варьируя частоту колебаний крыльев и оставляя постоянной их амплитуду.

Однако практическая разработка конструкций судов с движителем типа машущего крыла требует не только поиска новых технических решений, но и дальнейших исследований по гидродинамике машущего крыла, в частности теоретических и экспериментальных исследований влияния относительной толщины профиля и амплитуды колебаний крыла на силу тяги и гидродинамический коэффициент полезного действия.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Прандтль Л.** Гидроаэромеханика. М.: Изд-во иностр. лит., 1951.
2. **Некрасов А. И.** Теория крыла в нестационарном потоке. М.; Л.: АН СССР, 1947.
3. **Седов Л. И.** Плоские задачи гидродинамики и аэродинамики. М.; Л.: Гостехтеоретиздат, 1950.
4. **Белоцерковский С. М.** Математическое моделирование плоскопараллельного отрывного обтекания / С. М. Белоцерковский, В. Н. Котовский, М. И. Ништ, Р. М. Федоров. М.: Наука, 1988.

5. **Горелов Д. Н.** Нелинейная теория крыла в плоском нестационарном потоке. Омск: Полиграф. центр КАН, 2013.
6. **Чаплыгин С. А.** О давлении плоскопараллельного потока на преграждающие тела. М.; Л.: Гостехтеоретиздат, 1949. Т. 4.
7. **Голубев В. В.** Исследования по теории машущего крыла // Труды по аэродинамике. М.; Л.: Гостехтеоретиздат, 1957.
8. **Bratt J. B.** Flow patterns in the wake of an oscillating aerofoil: Aeronaut. Res. Conc. Rep. Mem. N 2773. S. 1., 1953.
9. **Гребешов Э. П., Коврижных Л. Д.** Пропульсивные характеристики крыла-двигателя, работающего вблизи экранирующих поверхностей // Тр. Центр. аэрогидродинам. ин-та. 1983. Вып. 2211. С. 6–20.

Поступила в редакцию 19/XI 2013 г.
