

УДК 533.6.013.16:533.6.013.02

MSC 76G25

Inertial-circulating principle of swimming and flight of hydro- and aerobionts. Part 2

A.V. Shekhovtsov

Institute of Hydromechanics NASU, Kyiv, Ukraine

E-mail: avshekhovtsov@gmail.com

For the case of modeling in the nonlinear ideal formulation of oscillations of an infinitely thin profile of the wing-propulsion, three components of the thrust force coefficient were distinguished - inertial, circulating, and vortex. The contribution to the traction force of each of the obtained components is investigated and the mechanisms of wing traction force formation at different types of oscillations are explained. It is revealed that the inertial-circulating principle underlies the work of the wing-propulsion. The inductive effect of the vortex trail on the traction force is small and negative.

Key words: Inertia-circulation principle, swimming, flight, thrust, oscillation of the wing-propulsion.

Инерционно-циркуляционный принцип плавания и полёта гидро- и аэробиионтов. Часть 2

А.В. Шеховцов

Институт гидромеханики НАНУ, Киев, Украина

E-mail: avshekhovtsov@gmail.com

Для случая моделирования в нелинейной идеальной постановке колебаний бесконечно тонкого профиля крыла-двигателя выделено три компонента коэффициента силы тяги - инерционная, циркуляционная и вихревая. Исследован вклад в силу тяги каждой из полученных компонент и объяснены механизмы образования силы тяги крыла при различных видах колебаний. Обнаружено, что в основе работы крыла-двигателя лежит инерционно-циркуляционный принцип. При этом индуктивное влияние вихревого следа на силу тяги мало и негативно.

Ключевые слова: Инерционно-циркуляционный принцип, плавание, полёт, коэффициент силы тяги, колебания крыла-двигателя.

4. Результаты численного моделирования и их анализ

Решение сингулярного интегро-дифференциального уравнения с начальными данными для скачка потенциала скорости (12) (см. ч.1 статьи в данном номере журнала), совместно с системой интегро-дифференциальных уравнений (10)-(11), свелось к решению задачи Коши для ансамбля дискретных вихрей, моделирующих свободную вихревую пелену. При этом на каждом временном слое решалась система линейных алгебраических уравнений относительно неизвестных циркуляций дискретных вихрей.

В общем случае крылу задавались возвратно-вращательные движения:

$$\beta(\tau) = \theta \cos(p^* \tau + \delta)$$

и возвратно-поступательные движения оси вращения в вертикальной плоскости:

$$y(\tau) = a \cos(p^* \tau).$$

При этом положительный отсчет угла перекадки крыла осуществлялся против часовой стрелки при движении крыла с точки зрения внешнего наблюдателя справа налево.

Заданные гармонические вращательно-поступательные колебания крыла-двигателя в безграничной жидкости определяются пятью безразмерными параметрами: линейной амплитудой a , угловой амплитудой θ , круговой частотой колебаний p^* или относительной скоростью λ_p , положением оси вращения d ($d = 0$ соответствует передней кромке, $d = 1$ - задней), фазовым сдвигом δ между вращательными и поступательными колебаниями.

На рис.1 для случая вращательных колебаний крыла при $d = 0$, $\theta = 3,8^\circ$ представлено поведение трех компонент коэффициента средней силы тяги, в зависимости от круговой частоты колебаний p^* . На этом и последующих рисунках кривые 1, 2 и 3 означают, соответственно, инерционную C_{T_i}/C_T , циркуляционную C_{T_c}/C_T и вихревую C_{T_v}/C_T приведенные компоненты коэффициента тяги. Из рисунка видно, что при этих вращательных колебаниях основной компонентой является инерционная (для $p^* < 5$ появляется отрицательный вклад циркуляционной компоненты, вклад же вихревой компоненты все время равен нулю). С другой стороны, известно, что при поступательных колебаниях, наоборот, вся сила тяги определяется величиной подсасывающей силы, имеющей циркуляционную природу.

Рис. 2 соответствует случаю вращательно-поступательных колебаний при $d = 0$, $\delta = -\pi/2$, $a = 0,5$ и $\theta = 30^\circ$. Приведенные компоненты C_{T_i}/C_T представлены в зависимости от относительной скорости крыла $\lambda_p = 1/(ap^*)$.

Штриховой линией показаны соответствующие значения максимального мгновенного угла атаки α_{\max} в градусах. Видно, что с увеличением α_{\max} (и уменьшением λ_p) циркуляционная компонента возрастает и становится положительной при $\lambda_p < 1,1$, однако инерционная, несмотря на некоторое уменьшение, по-прежнему преобладает при близкой к нулю отрицательной вихревой компоненте. То есть, качественно картина вклада компонент та же, что и при рассмотренных выше вращательных колебаниях.

Как было показано в [1], при изменении параметров вращательно-поступательных колебаний крыла-двигателя, для достижения требуемых пропульсивных характеристик принципиально важным является соблюдение условия $\alpha_{\max} = const$.

Кроме того, согласно Грэму Тейлору, Роберту Наддсу, Адриану Томасу, которые провели исследования для 42 разновидностей летучих мышей, насекомых и птиц, число Струхала $St = 1/(\pi\lambda_p)$ лежит в диапазоне $0,2 < St < 0,4$ (при этом $0,8 < \lambda_p < 1,6$, что в свою очередь, характерно для плавания рыб и дельфинов [1]). Это соответствует совместному оптимуму для коэффициента силы тяги C_T и коэффициента полезного действия η , причем для случая, когда $\alpha_{\max} = 15^\circ$, угол

наклона траекторії руху осі обертання крила-двигателя в середній її частині $\phi = \arctan(1/\lambda_p)$ складає $\sim 45^\circ$, а $\lambda_p \sim 1$ [1,2].

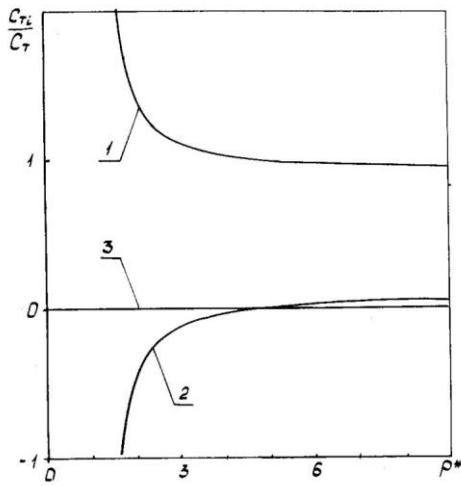


Рис.1 Поведення приведених компонент середньої сили тяги в залежності від кругової частоти коливань при $a=0$, $d=0$, $\theta=3,8^\circ$.

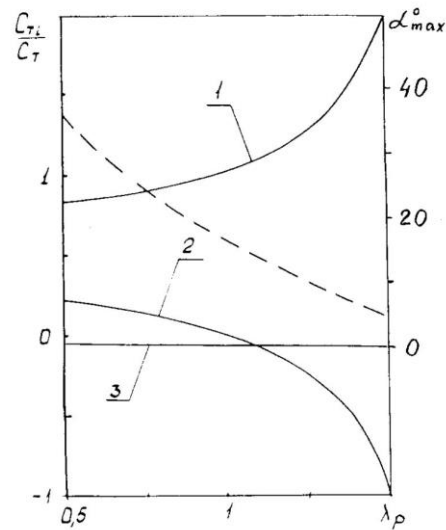


Рис.2 Поведення приведених компонент середньої сили тяги в залежності від відносної швидкості крила при $a=0,5$, $d=0$, $\delta=-\pi/2$ і $\theta=30^\circ$.

Поэтому представляет интерес рассмотреть два режима из указанного выше диапазона для относительной скорости крыла-двигателя: $\lambda_p=0,884$ (см. рис.3) и $\lambda_p=1,1$ (см. рис.4). При этом $\alpha_{\max}=15^\circ$, $a=0,5$, $d=0$, $\delta=-\pi/2$, $\tau=4,5T$, где $T=2\pi/p^*$.

На рисунках 3 и 4 представлены: картины вихревых следов (а), поля скоростей (б), линии равных коэффициентов давлений (изобары, рассчитанные в соответствии с работой [3]) (с) и картины линий тока (д).

Видно, что небольшое влияние на давление вблизи крыла оказывает лишь ближайший к крылу участок вихревого следа и ближний вихрь, в то время как остальные вихревые образования почти не влияют на него. Важно отметить, что для всех режимов работы крыла-двигателя сошедшие вихри всегда будут располагаться с наветренной стороны крыла, то есть всегда будут вносить с этой стороны крыла вместо поджатия потока его разрежение.

И, наконец, на рис.5 представлено поведение приведенных компонент коэффициента тяги C_{T_i}/C_T в зависимости от относительной скорости крыла. При этом для всех λ_p соблюдается условие $\alpha_{\max}=15^\circ$. Штриховой кривой показано изменение угловой амплитуды θ . Остальные параметры – прежние.

Из рисунка видно, что инерционная компонента положительна и монотонно возрастает при увеличении θ и уменьшении λ_p , в то же время при $\lambda_p < 1$ отрица-

тельное влияние вихревой компоненты резко возрастает, что объясняется большим углом разворота крыла к ближайшему вихрю следа ($\theta \sim 50^\circ - 70^\circ$), который создает разрежение с наветренной стороны крыла, уменьшая тем самым перепад давления на крыле. При $\lambda_p > 1$ вихревая компонента пренебрежимо мала, а при $\lambda_p > 3$ основной вклад в силу тяги вносит циркуляционная компонента, что соответствует режиму, близкому к квазистационарному.

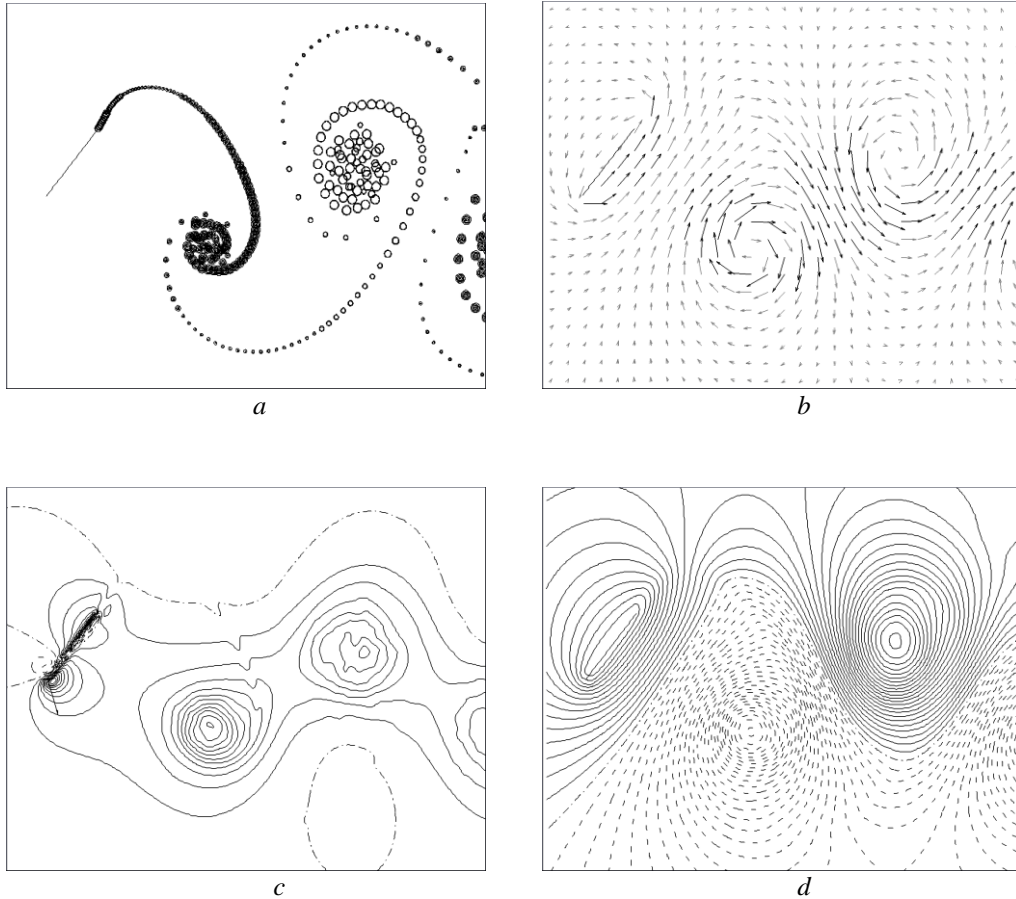


Рис.3 Вихревой след (а), поле скорости (b), линии равных коэффициентов давлений (изобары, рассчитанные в соответствии с [3]) (с) и линии тока (d) при $\lambda_p = 0,884$.

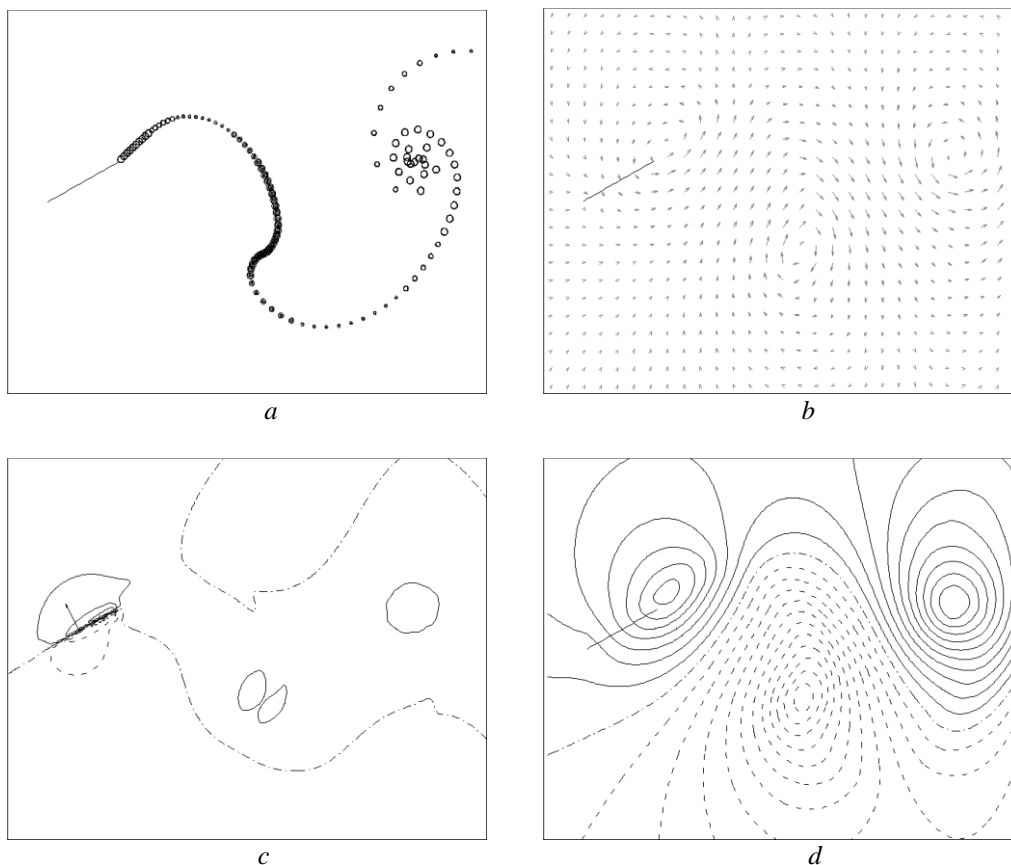


Рис.4 Вихревой след (а), поле скорости (b), линии равных коэффициентов давлений (изобары, рассчитанные в соответствии с [3]) (с) и линии тока (d) при $\lambda_p = 1,1$.

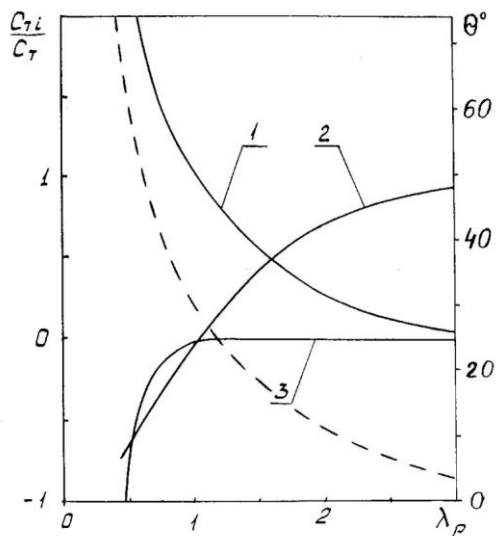


Рис.5 Поведение приведенных компонент средней силы тяги в зависимости от относительной скорости крыла при $\alpha_{\max} = 15^\circ$, $a = 0,5$, $d = 0$, $\delta = -\pi/2$.

5. Заключение

Полученные результаты позволяют сделать вывод о том, что в основе работы крыла-двигателя лежит инерционно-циркуляционный принцип создания силы тяги, причем для малых относительных скоростей крыла преобладает вклад инерционных сил, а для больших – циркуляционных. Для двухчастных случаев колебаний крыла-двигателя – вращательных и поступательных справедливы, соответственно, инерционный и циркуляционный принципы создания силы тяги. При этом индуктивное влияние сошедших с крыла вихрей мало и сводится к уменьшению силы тяги крыла-двигателя.

ЛИТЕРАТУРА

1. Shekhovtsov A.V. Non-Linear Mathematical Model of Dolphin Tail Fin Motion. *International Journal of Fluid Mechanics Research*. 2001. **28**, № 1/2. P. 240–265.
2. Шеховцов А.В. Нелинейная нестационарная гидроаэродинамика крыла-двигателя с двумя степенями свободы: Автореф. дисс. канд. физ.-мат. наук: 01.02.05, Киев. 1999. 20 с.
3. Shekhovtsov A.V. A Method for Evaluation of an Unsteady Pressure Field in a Mixed Potential-Vortical Domain Adjacent to the Rotating Wing. *International Journal of Fluid Mechanics Research*. 2002. **29**, № 1. P. 111–123.

Надійшла 30.05.2021.

Інерційно-циркуляційний принцип плавання і польоту гідро- і аеробіонтів. Частина 2

О.В. Шеховцов

Інститут гідромеханіки НАНУ, Київ, Україна

E-mail: avshekhovtsov@gmail.com

Для випадку моделювання в нелінійній ідеальній постановці коливань нескінченно тонкого профілю крила-рушії виділено три компоненти коефіцієнта сили тяги – інерційну, циркуляційну і вихрову. Досліджено внесок в силу тяги кожної з отриманих компонент і пояснено механізми утворення сили тяги крила при різних видах коливань. Виявлено, що в основі роботи крила-рушії лежить інерційно-циркуляційний принцип. При цьому індуктивний вплив вихрового сліду на силу тяги малий і негативний.

Ключові слова: Інерційно-циркуляційний принцип, плавання, політ, коефіцієнт сили тяги, коливання крила-рушії.