

УДК 577.31

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ КИНЕМАТИКИ ХВОСТОВОЙ ЛОПАСТИ ДЕЛЬФИНА

© 1998 г. Е. В. Романенко, С. Г. Пушков

Представлено академиком Д.С. Павловым 05.01.97 г.

Поступило 07.02.97 г.

Активные исследования гидромеханики плавания дельфинов проводятся учеными многих стран преимущественно после выхода в свет работ английского зоолога Грея [6], который обнаружил, что дельфины очень экономно расходуют энергию в процессе плавания. По его данным для достижения дельфином определенной скорости плавания ему требуется значительно меньше энергии (в несколько раз), чем любому телу дельфиноподобной формы. Главная причина, по мнению Грея, состоит в том, что дельфины способны активно управлять своим пограничным слоем и тем самым уменьшать гидродинамическое сопротивление своего тела. Это предположение Грея вошло в научную литературу как “парадокс Грея”. Исследователи разных стран на протяжении многих десятилетий пытаются выяснить, существует ли парадокс Грея и, если существует, то какими механизмами обладают дельфины для уменьшения гидродинамического сопротивления. Один из возможных механизмов связывают с оптимизацией работы движителя дельфина – хвостового плавника, который работает как гидродинамическое крыло. Вопросу математического моделирования работы хвостового плавника рыб и дельфинов посвящено достаточно большое количество работ [2–4, 7–10], в которых оценивается сила тяги и коэффициент полезного действия колеблющихся крыльев разной формы, удлинения, гибкости, с различным положением оси вращения. Последний параметр – положение оси вращения крыла – заметно влияет на силу тяги крыла и его эффективность. Однако совершенно отсутствуют экспериментальные работы по кинематике хвостовой лопасти дельфина, которые позволили бы оценить положение оси ее вращения. По этой причине выводы теоретических моделей об эффективности и силе тяги, развиваемой хвостовой лопастью дельфина, характеризуются некоторой неопределенностью.

В настоящей работе представлены результаты экспериментального изучения кинематики хвостовой лопасти трех особей дельфина афалины (*Tursiops truncatus*) приблизительно одинаковой длины (около 220 см) и оценки по этим данным положения оси ее вращения. Кинематику хвостовой лопасти дельфинов изучали кинематографическим методом в морском вольере Утришской морской станции Института проблем экологии и эволюции им. А.Н. Северцова РАН. Вольер изготовлен в форме длинного коридора из капроновой сети с ячейей 10 см × 10 см. Размеры коридора: длина 70 м, ширина 6 м, глубина 3 м. Дельфин был приучен плавать в коридоре из одного конца в другой. Киносъемку осуществлял кинооператор-водолаз через боковую стенку вольера с помощью кинокамеры на киноленту шириной 16 мм.

В имеющихся немногочисленных экспериментальных работах [1, 5, 10] при оценке кинематических параметров хвостовой лопасти дельфина последнюю аппроксимировали плоским жестким гидродинамическим крылом. Однако анализ кинограмм показывает, что в процессе активного плавания дельфина его хвостовая лопасть значительно деформируется, особенно в верхнем и нижнем положениях. Это иллюстрирует рис. 1а, на котором показана хвостовая лопасть в крайнем нижнем положении. Лопасть изгибается в том месте, где оканчиваются хвостовые позвонки. На рис. 1б показана форма хвостовой лопасти в некотором среднем положении траектории ее движения (между верхней и нижней крайними точками). Видно, что лопасть имеет форму дуги.

Для дальнейшего рассмотрения полезно обозначить основные элементы лопасти, как показано на рис. 2. Сравнивая рис. 1 и 2, можно констатировать, что в поворотных точках траектории лопасти (верхней и нижней) часть от  $-c$  до  $+c$  остается практически прямолинейной и к ней может быть применен закон движения, предложенный Лайтхиллом [9] для описания движения колеблющегося двумерного жесткого крыла, имитирующего хвостовой полулунный плавник рыб, в форме

$$y = [h - i\theta(x - b)] \exp(i\omega t) \quad (-c < x < c), \quad (1)$$

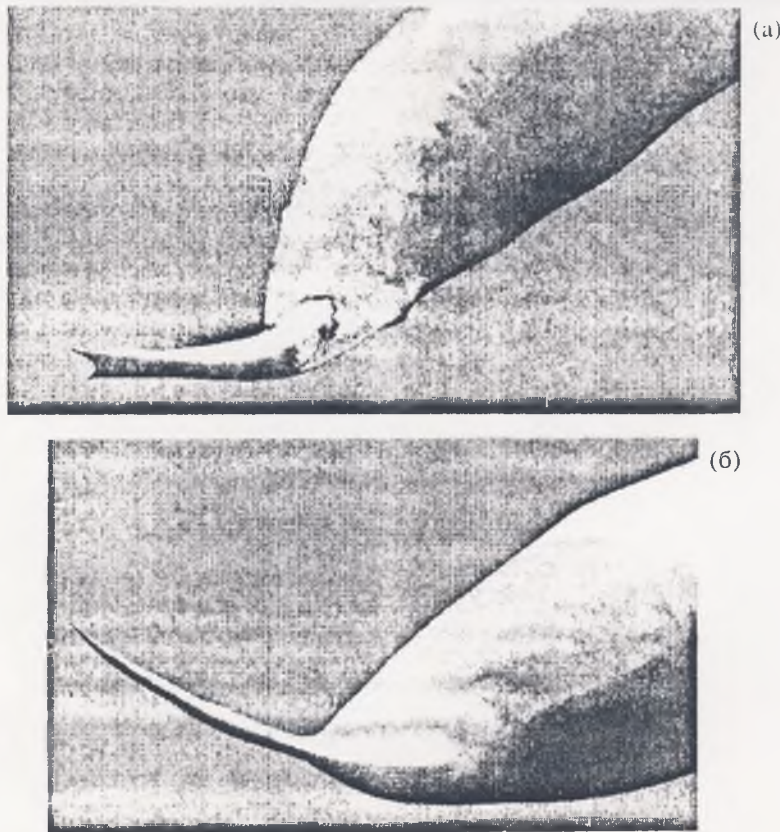


Рис. 1. Хвостовая лопасть в крайнем нижнем положении (а) и в среднем положении (б).

где  $h$  и  $\theta$  – амплитуды линейного и углового движения лопасти соответственно,  $b$  – расстояние от начала координат до оси вращения,  $c$  – полу хорда крыла,  $\exp(i\omega t)$  – временной множитель, характеризующий гармонический характер движения лопасти. В дальнейшем мы опустим этот множитель, так как на результаты рассмотрения он не влияет. Закон движения (1) предполагает фазовый сдвиг между линейными и угловыми движениями лопасти, равный  $90^\circ$ . Амплитудное значение колебаний, нормированное по длине полу хорды, имеет вид

$$y/c = \sqrt{[(h/c)^2 + \theta^2(x/c - b/c)^2]}.$$

Амплитуда смещения точек лопасти с координатой  $(-c)$  на рис. 2 будет определяться выражением

$$y^{(-c)}/c = \sqrt{[(h/c)^2 + \theta^2(-1 - b/c)^2]} \text{ при } x = -c.$$

Соответственно для точек с координатой  $(+c)$

$$y^{(+c)}/c = \sqrt{[(h/c)^2 + \theta^2(1 - b/c)^2]} \text{ при } x = +c.$$

Отношение амплитуд в указанных точках имеет вид

$$y^{(-c)}/y^{(+c)} = \frac{\sqrt{[(h/c)^2 + \theta^2(-1 - b/c)^2]}}{\sqrt{[(h/c)^2 + \theta^2(1 - b/c)^2]}}. \quad (2)$$

Из формулы (2) видно, что амплитуды смещения в точках  $(-c)$  и  $(+c)$  лопасти одинаковы лишь в одном случае: когда  $b/c = 0$ . Если  $b/c$  отлично от 0, соотношение амплитуд  $y^{(-c)}/y^{(+c)}$  определяется тремя величинами:  $h/c$ ,  $\theta$  и  $b/c$ . Нас интересует положение оси вращения лопасти, т.е. величина  $b/c$ . Полученные в результате эксперимента с дельфинами кинограммы позволяют оценить соотношение амплитуд  $y^{(-c)}/y^{(+c)}$ , амплитуду колебаний лопасти  $h/c$  и максимальный угол наклона лопасти к горизонтальной оси  $\theta$ . Анализ большого числа кинограмм (несколько десятков) показывает, что соотношение амплитуд  $y^{(-c)}/y^{(+c)}$  изменяется в пределах от 1 до 1.1 и относительная амплитуда колебаний крыла  $h/c = 2.69$ . Более привычно относить амплитуду колебаний хвостовой лопасти к ее корневой хорде  $(-c1 + c2$  на рис. 2). Обозначив корневую хорду через  $c_0$ , получим  $h/c_0 = 1.14$ .

Для определения угла  $\theta$  представим хвостовую лопасть дельфина, изображенную на рис. 1б, в форме дуги соответствующей кривизны. На рис. 3

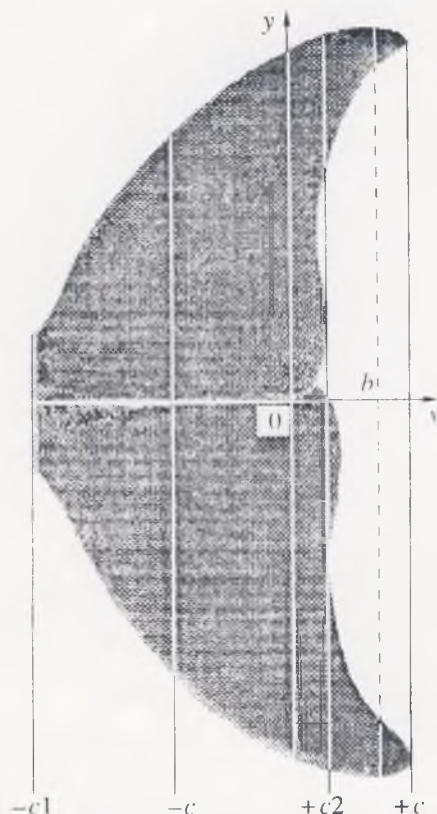


Рис. 2. Фотография хвостовой лопасти дельфина с разметкой характерных участков (штриховой линией обозначено текущее, пока неизвестное, положение оси вращения, остальные обозначения в тексте).

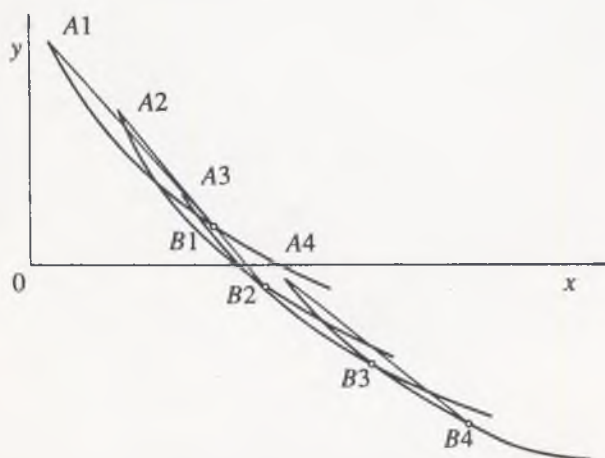


Рис. 3. Последовательные положения хвостовой лопасти дельфина, представленной в виде дуги, при ее движении из крайнего верхнего положения в нижнее (пояснения в тексте).

показаны 4 дуги, отражающие положение хвостовой лопасти дельфина на четырех последовательных кадрах кинограммы в моменты времени, когда лопасть двигалась от верхнего положения к нижнему. На дугах выделены участки A1B1,

A2B2, A3B3 и A4B4, соответствующие части хвостовой лопасти  $(-c + c)$  на рис. 2 (буквами B1B4 обозначены места окончания позвоночника в пределах хвостовой лопасти, помеченные светлыми точками). Углы наклона хорд A1B1, A2B2, A3B3 и A4B4, равные в данном конкретном случае соответственно  $\theta_1 = 48.5^\circ$ ,  $\theta_2 = 51^\circ$ ,  $\theta_3 = 42^\circ$  и  $\theta_4 = 38^\circ$ , отражают динамику изменения угла наклона хвостовой лопасти (точнее, участка лопасти  $-c + c$ ) в процессе ее движения. Для оценки положения оси вращения лопасти будем использовать максимальное значение угла ее наклона, усредненное по 22 кинограммам в диапазоне скоростей плавания от 2.1 м/с до 3.3 м/с, равное  $\theta = 45.4^\circ \pm 1^\circ$ . Подставив измеренные значения  $y^{(-c)}/y^{(+c)}$ ,  $h/c$  и  $\theta$  в формулу (2), получим, что  $b/c = 0$  при  $y^{(-c)}/y^{(+c)} = 1$  и  $b/c = 0.62$  при  $y^{(-c)}/y^{(+c)} = 1.1$ .

Учитывая, что на рис. 2 представлена фотография реальной хвостовой лопасти дельфина *Tursiops truncatus*, и введя обозначения  $b_0 = c1 + b$  – расстояние оси вращения от передней кромки лопасти и  $c_0 = c1 + c2$  – корневая хорда лопасти, путем несложных преобразований получим выражение для относительного положения оси вращения лопасти в виде

$$b_0/c_0 = (c1 + b)/(c1 + c2).$$

Поделив числитель и знаменатель в правой части на  $c$  и воспользовавшись значениями отношений  $c1/c = 2.06$  и  $c2/c = 0.24$ , определенных непосредственно по фотографии на рис. 2, получим

$$b_0/c_0 = 0.9 + 0.43(b/c). \quad (3)$$

По формуле (3) можно вычислить относительное положение оси вращения лопасти при крайних значениях величины  $b/c$ :  $b_0/c_0 = 0.9$  при  $b/c = 0$  и  $b_0/c_0 = 1.17$  при  $b/c = 0.62$ . Полученные результаты свидетельствуют о том, что ось вращения хвостовой лопасти дельфина расположена вблизи ее задней кромки, что хорошо согласуется с предположением Лайтхилла [9].

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Каян В.П. // Бионика. 1979. № 13. С. 9.
2. Ahmadi A., Widnall S.E. // J. Fluid Mech. 1985. V. 162. P. 59.
3. Chopra M.G. // Ibid. 1976. V. 74. P. 161.
4. Chopra M.G., Kambe T. // Ibid. 1977. V. 79. P. 49.
5. Fish F.E. // J. Exp. Biol. 1993. V. 185. P. 179.
6. Gray J. // Ibid. 1936. V. 13. P. 192.
7. Katz J., Weihs D. // J. Fluid Mech. 1979. V. 90. № 4. P. 13.
8. Lan C.E. // Ibid. 1979. V. 93. № 4. P. 747.
9. Lighthill M.J. // Ibid. 1970. V. 44. P. 265.
10. Wu T.Y.-T. // Ibid. 1971. V. 46. № 3. P. 521.