РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК

# УСПЕХИ СОВРЕМЕННОЙ БИОЛОГИИ

(ОТДЕЛЬНЫЙ ОТТИСК)

МОСКВА

# УСПЕХИ СОВРЕМЕННОЙ БИОЛОГИИ

1997

ВЫП. 4

УДК 577.31

TOM 117

#### © 1997 г. Е.В. РОМАНЕНКО, С.Г. ПУШКОВ

# О ПОЛОЖЕНИИ ОСИ ВРАЩЕНИЯ И УГЛЕ АТАКИ ХВОСТОВОЙ ЛОПАСТИ ДЕЛЬФИНА

Доказано, что ось вращения хвостовой лопасти дельфина расположена вблизи задней кромки лопасти (между 0,9 и 1,17 значения корневой хорды). Это положение оси вращения лопасти хорошо согласуется с теоретически предсказанным Лайтхиллом и Ву. Установлено, что хвостовая лопасть дельфина в процессе создания тяги заметно деформируется, особенно в верхнем и нижнем положениях. Сделан вывод, что применявшаяся до сих пор учеными разных стран методика оценки угла атаки хвостовой лопасти приводила к недостоверным результатам. Предложена новая методика оценки угла атаки хвостовой лопасти, основанная на том, что лопасть аппроксимируется тонким профилем (дужкой), теория обтекания которого хорошо изучена. Угол атаки оказался равен 3,4° в интервале скоростей плавания 2,1-3,3 м/с.

#### **ВВЕДЕНИЕ**

Активные исследования гидромеханики плавания дельфинов проводятся учеными многих стран, особенно после выхода в свет работ английского зоолога Грея [8], который обнаружил, что дельфины очень экономно расходуют энергию в процессе плавания. По его данным, для достижения определенной скорости плавания дельфину требуется значительно меньше энергии (в несколько раз), чем любому телу подобной 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 снижения гидродинамического сопротивления. Один из возможных механизмов связывают с оптимизацией работы движителя дельфина – хвостового плавника, работающего как гидродинамическое крыло. Вопросу математического моделирования работы хвостового плавника рыб и дельфинов посвящено достаточно большое количество работ [4-6, 9-13], в которых оценивается сила тяги и коэффициент полезного действия колеблющихся крыльев с различными характеристиками: формой, удлинением, гибкостью, положением оси вращения и значениями угла атаки. Последние два параметра заметно влияют на силу тяги крыла и эффективность его работы. Однако совершенно отсутствуют экспериментальные работы по кинематике хвостовой лопасти дельфина, которые позволили бы оценить положение оси ее вращения. Имеющиеся же в литературе данные по измерениям угла атаки нуждаются в серьезных уточнениях. Дело в том, что при оценке кинематических параметров хвостовой лопасти дельфина [1, 7, 13] последнюю аппроксимировали плоским жестким гидродинамическим крылом (рис. 1). Однако анализ кинограмм показывает, что в процессе активного плавания дельфина его хвостовая лопасть значительно деформируется, особенно в верхнем и нижнем положениях (рис. 2, a). Заметнее всего она изгибается в том месте, где оканчиваются

Puc, I. работь XBOCTO

> HE TC HE H. 11 JII.

> > л

p

Ð

XB

Рис. 1. Пример аппроксимации хвостовой лопасти дельфина жестким гидродинамическим крылом (из работы [7]): 1 – дельфин, 2 – траектория движения хвостовой лопасти, 3 – крыло, аппроксимирующее хвостовую лопасть, 4 – касательная к траектории движения лопасти



Рис. 2. Хвостовая лопасть в крайнем нижнем (а) и среднем (б) положениях

хвостовые позвонки. На рис. 2,6 показана форма хвостовой лопасти в некотором среднем положении траектории ее движения (между верхней и нижней крайними точками). Видно, что лопасть имеет форму дуги. В упомянутых работах совершенно не оговаривается способ аппроксимации, из которого было бы ясно, как искривленную лопасть дельфина заменяют плоским крылом. По-видимому, по этой причине опубликованные в литературе данные измерений угла атаки хвостовой лопасти дельфина имеют значительный разброс (таблица).

Отсутствие экспериментальных данных о положении оси вращения хвостовой лопасти дельфина и разброс данных об углах атаки не позволяют достаточно корректно оценить эффективность ее работы и развиваемую силу тяги с помощью известных теоретических моделей.



Рис. 3. Схема эксперимента (пояснения в тексте)

В настоящей работе представлены результаты экспериментального изучения кинематики хвостовой лопасти дельфина афалины (Tursiops truncatus) и оценки по этим данным положения оси ее вращения и угла атаки.

### МАТЕРИАЛ И МЕТОДИКА

Эксперименты проводили на трех самцах дельфинов афалин приблизительно одного размера – длина тела около 220 см. Кинематику хвостовой лопасти дельфинов изучали в морском вольере кинематографическим методом. Морской вольер принадлежит Утришской морской станции Института проблем экологии и эволюции им. А.Н. Северцова РАН. На рис. 3 показано расположение морского вольера (не в масштабе). Вольер состоит из двух частей. Одна часть (1) площадью 100 м<sup>2</sup> (10 × 10) служит для длительного содержания животного. Она изготовлена из капроновой сети (размер ячеи 10 × 10 см), имеющей форму мешка и закрепленной внутри каркаса из

Turs To x

Экспер

Sota

стальны предста Она сд ширина платфо во втор стимул дельфи киноог

> Опр обозна лопас<sup>7</sup> траек<sup>7</sup> прямо движе двуме рыб: у =

> > где x соотв ница, ничео нейш движ лопас Ал

> > > y =

или і

У

Амп выр

Y

Coo

3

Экспериментально оцененные значения углов атаки (α) хвостовой лопасти дельфина при различных скоростях его плавания (U)

Вид	α, град.	<i>U</i> , м/с	Источник	
Tursiops truncatus	4-6	2,3	[1]	
То же	3,4	2,35	[12]	
11	3,6	4,3	[3]	
m –	19,5–12	2,0-6,0	[7]	
Sotalia guianensis	8,8	2,4	[12]	

стальных труб. В этой части вольера установлен помост (2). Вторая часть вольера (3) представляет собой длинный коридор, соединяющий первую часть вольера с берегом. Она сделана из такой же капроновой сети, что и первая. Длина коридора – 70 м, ширина – 6 м, глубина – 3 м. В прибрежной части коридора находится плавучая платформа (4). На время эксперимента дельфина переводили из первой части вольера во вторую. Дельфин был приучен плавать в коридоре из одного конца в другой. Для стимуляции дельфина кормили в обоих концах коридора. Операторы, кормившие дельфина, находились на помосте (2) и платформе (4). Киносъемку осуществлял кинооператор-водолаз через боковую стенку вольера с помощью кинокамеры (5).

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Определение положения оси вращения лопасти. Для дальнейшего рассмотрения обозначим основные элементы лопасти, как показано на рис. 4 (фотография реальной лопасти дельфина). При сравнении рис. 2, а и 4 видно, что в поворотных точках траектории лопасти (верхней и нижней) часть от -c до +c остается практически прямолинейной. Следовательно, для этой части может быть применен закон движения, предложенный Лайтхиллом [11] для описания движения колеблющегося двумерного жесткого крыла (рис. 5), имитирующего хвостовой полулунный плавник рыб:

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

где x и y – координаты, h и  $\theta$  – амплитуды линейного и углового движения лопасти соответственно, b – расстояние от начала координат до оси вращения, i – мнимая единица, c – полухорда крыла,  $\exp(i\omega t)$  – временной множитель, характеризующий гармонический характер движения лопасти,  $\omega = 2\pi f, f$  – частота колебаний хвоста. В дальнейшем мы опустим этот множитель, так как на результаты он не влияет. Закон движения (1) предполагает фазовый сдвиг между линейными и угловыми движениями лопасти, равный 90°.

Амплитудное значение колебаний имеет вид:

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

или в нормированном по длине полухорды виде:

$$y/c = \sqrt{[(h/c)^2 + \theta^2 (x/c - b/c)^2]}.$$
(3)

Амплитуда смещения точек лопасти с координатой (-*c*) (см. рис. 4) будет определяться выражением

$$y^{(-c)} / c = \sqrt{[(h/c)^2 + \theta^2 (-1 - b/c)^2]}.$$
(4)

Соответственно для точек с координатой (+*c*):

$$y^{(+c)} / c = \sqrt{[(h/c)^2 + \theta^2 (1 - b/c)^2]}.$$
(5)

499



Рис. 4. Фотография хвостовой лопасти дельфина с разметкой характерных участков (штриховой линией обозначено пока неизвестное положение оси вращения, остальные обозначения в тексте)

Отношение амплитуд в указанных точках имеет вид:

$$y^{(-c)} / y^{(+c)} = \sqrt{\left[(h/c)^2 + \theta^2(-1 - b/c)^2\right]} / \sqrt{\left[(h/c)^2 + \theta^2(1 - b/c)^2\right]}.$$
(6)

Из формулы (6) 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 (несколько десятков) позволили рассчитать соотношение амплитуд  $y^{(-c)}/y^{(+c)}$ , амплитуду колебаний лопасти h/c и максимальный угол наклона лопасти к горизонтальной оси  $\theta$ . Значения  $y^{(-c)}/y^{(+c)}$  изменялись в пределах от 1 до 1,1, а величина h/c равнялась 2,69. Более привычно относить амплитуду колебаний хвостовой лопасти к ее корневой хорде (от  $-c_1$  до  $+c_2$  на рис. 4). Обозначим корневую хорду через  $c_0$ . Полученное значение  $h/c_0$  равно 1,14.

Для определения угла  $\theta$  представим хвостовую лопасть дельфина, изображенную на рис. 2,6, в форме дуги соответствующей кривизны. На рис. 6 показаны четыре 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  $A_1B_1$ ,  $A_2B_2$ ,  $A_3B_3$  и  $A_4B_4$ , соответствующие части хвостовой лопасти от -c до +c на рис. 4 (буквами  $B_1-B_4$  обозначены места окончания позвоночника в пределах хвостовой лопасти, помеченные светлыми точками). Углы наклона хорд  $A_1B_1$ ,  $A_2B_2$ ,  $A_3B_3$  и  $A_4B_4$ , соответственно  $\theta_1$ ,  $\theta_2$ ,  $\theta_3$ ,  $\theta_4$ , равны в данном конкретном случае 48,5, 51, 42 и 38°. Они отражают динамику изменения угла наклона хвостовой лопасти (точнее дучастка лопасти от -c до +c) в процессе ее движения.

Для оценки положения оси вращения лопасти будем использовать максимальное значение угла ее наклона, усредненное по большому числу (22) кинограмм в

Ри диат

у<sup>(-с)</sup> З дел щих (

изм

ИЗ

= 0 BP

B

500



Рис. 6. Схема определения положения оси вращения хвостовой лопасти дельфина (пояснения в тексте)

диапазоне скоростей плавания от 2,1 до 3,3 м/с,  $-\theta = 45,4 \pm 1,0^{\circ}$ . Подставивизмеренные значения  $y^{(-c)}/y^{(+c)}$ , h/c и  $\theta$  в формулу (6), 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. 4 представлена фотография реальной хвостовой лопасти дельфина Tursiops truncatus, выпишем несколько очевидных соотношений, связывающих размеры отдельных ее частей:

$(c_1 - c)/(c_1 + c) = 0,35,$	(7)
$(c_2 + c)/(c_1 + c) = 0,41,$	(8)
$(c - c_2)/(c_1 + c) = 0,24,$	(9)

из которых следуют выражения:

$$c = 0.33(c_1 + c), \tag{10}$$

$$c_1 = 0,68(c_1 + c), \tag{11}$$

$$c_2 = 0.08(c_1 + c). \tag{12}$$

Введем параметры: расстояние оси вращения от передней кромки лопасти –  $b_0 = c_1 + b$  и корневая хорда лопасти –  $c_0 = c_1 + c_2$ . Тогда относительное положение оси вращения лопасти может быть записано в виде

$$b_0/c_0 = (c_1 + b)/(c_1 + c_2).$$
<sup>(13)</sup>

Поделив числитель и знаменатель в правой части на с и воспользовавшись соотношениями (10)–(12), получим:

$$b_0/c_0 = 0.9 + 0.43(b/c). \tag{14}$$

Учитывая, что соотношение амплитуд  $y^{(-c)}/y^{(+c)}$  концов участка лопасти от -c до +c в процессе активного плавания в интервале скоростей от 2,1 до 3,3 м/с изменяется от 1 до 1,1 и при этом величина b/c варьирует от 0 до 0,62, можно по формуле (14) вы-



Рис. 7. Двумерное крыло в форме дужки



Рис. 8. Схема определения угла атаки хвостовой лопасти дельфина (пояснения в тексте)

числить относительное положение оси вращения лопасти при крайних значениях величины *b*/*c*:

$b_0/c_0 = 0,9$	при	b/c = 0,	(15)
$b_0/c_0 = 1,17$	при	b/c = 0,62.	(16)

Полученные результаты свидетельствуют о том, что ось вращения хвостовой лопасти дельфина расположена вблизи ее задней кромки, что хорошо согласуется с предположением Лайтхилла [11].

Определение угла атаки хвостовой лопасти дельфина. Для пояснения методики определения угла атаки хвостовой лопасти дельфина полезно рассмотреть двумерное жесткое крыло, имеющее профиль в форме дужки (рис. 7). Направление нулевого угла атаки, обозначенное как  $V_{\infty}^{0}$ , у такого крыла совпадает с линией, проходящей через точки A и B [12]. На том же рисунке показан вектор скорости потока  $V_{\infty}^{1}$ , направленного под углом атаки  $\alpha$  к дужке. Можно предположить, что обтекание дугообразной хвостовой лопасти дельфина в первом приближении будет таким же, как у представленной на рис. 7 дужки.

На рис. 8 показаны те же четыре дуги, что и на рис. 6, отражающие положение хвостовой лопасти дельфина на четырех последовательных кадрах кинограммы. 502

HE

1234

5

6

7

8

9

11 12

13

MI

ИМ

Ш В.

Б ст ні сч

H

Ha

HY

KC

се эт ла уг гс

зн ат А: да

ГИ

Ц¥ ас нс ог

Буквами  $A_1 - A_4$  обозначены положения оси вращения хвостовой лопасти в пространстве в процессе ее движения (светлые точки), характеризующие траекторию движения лопасти. В соответствии с результатами, полученными в прелыдущем разделе, считаем, что в данном случае ось вращения лопасти совпадает с ее задней кромкой. Направление касательной к траектории движения лопасти, как известно, определяет направление обтекающего потока. Угол атаки лопасти, как это следует из рис. 7, заключен между касательной к траектории движения лопасти и направлением ее нулевого угла атаки. Касательная к траектории на рис. 8 для положения лопасти, характеризуемого осью А2, совпадает с линией, проходящей через точки А1, А2 и А3, которые в данном случае находятся на одной прямой. Направление нулевого угла атаки лопасти с осью А2 проходит через точку А2 и конец отрезка d, проведенного из середины хорды  $A_{2}B_{2}$  перпендикулярно к ней до пересечения с дугой. Угол  $\alpha$  между этими двумя линиями представляет собой искомый угол атаки, он равен 3,5°. Определенное нами путем анализа большого числа (33) кинограмм усредненное значение угла атаки хвостовой лопасти, соответствующее моменту пересечения лопастью горизонтальной оси, оказалось равным 3,4°.

Изложенный подход к оценке угла атаки позволяет объяснить завышенные его значения, полученные в работах [7, 13]. Действительно, если (рис. 8) при оценке угла атаки пользоваться не направлением его нулевого значения, а направлением хорды  $A_2B_2$ , то он будет равен 10°. Большое число подобных оценок, будучи усредненными, дает значение 9,6°.

Полученные результаты вносят определенную ясность в два важных аспекта гидромеханики дельфинов: положение оси вращения хвостовой лопасти, как нестационарного гидродинамического крыла, и значение ее реального угла атаки. В этих аспектах до настоящего времени существовала полная неопределенность, что серьезно затрудняло использование известных математических моделей [5, 6, 11, 13] для оценки тяги и коэффициента полезного действия хвостовой лопасти.

Пользуемся случаем выразить искреннюю благодарность коллегам, помогавшим при выполнении экспериментов и подготовке рукописи к печати, особенно В.А. Тарчевской, В.А. Чикалкину, О.В. Савинкину, Т.М. Борщевой и А.В. Шубкиной.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Каян В.П. // Бионика. 1979. № 13. С. 9.

2. Лойцянский Л.Г. Механика жидкости и газа. М.: Наука, 1987. 840 с.

3. Романенко Е.В. Теория плавания рыб и дельфинов. М.: Наука, 1986. 152 с.

- 4. Ahmadi A., Widnall S.E. // J. Fluid Mech. 1985. V. 162. P. 59.
- 5. Chopra M.G. // J. Fluid Mech. 1976. V. 74. P. 161.
- 6. Chopra M.G., Kambe T. // J. Fluid Mech. 1977. V. 79. P. 49.
- 7. Fish F.E. // J. Exptl Biol. 1993. V. 185. P. 179.
- 8. Gray J. // J. Exptl Biol. 1936. V. 13. P. 192.

9. Katz J., Weihs D. // J. Fluid Mech. 1979. V. 90. № 4. P. 713.

- 10. Lan C.E.// J. Fluid Mech. 1979. V. 93. № 4. P. 747.
- 11. Lighthill M.J. // J. Fluid Mech. 1970. V. 44. P. 265.
- 12. Videler J.J., Kamermans P. // J. Exptl Biol. 1985. V. 119. P. 265.
- 13. Wu T.Y-T. // J. Fluid Mech. 1971. V. 46. № 3. P. 521.

Институт проблем экологии и эволюции им А.Н. Северцова РАН, Москва

#### E.V. ROMANENKO, S.G. PUSHKOV

#### ON POSITION OF ROTATION AXIS AND ATTACK ANGLE OF DOLPHIN'S FLUKES

A.N. Severtsov Institute of Ecology and Evolution, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

The rotation axis was found to be situated near the posterior edge of flukes (within 0.9-1.17 value of the root chord). Position of the rotation axis well agress with the theoretically predicted one according to Lighthill and Wu. The dolphin's flukes gets markedly deformed during thrusting, especially in the upper and lower positions. The method for estimating the attack angle of the flukes widely applied by scientists from different countries provides unreliable results. The reason in that flukes was approximated by the flat undeformed ringed wing. A new suggested method to estimate the attack angle of flukes in based on its approximation by the fine profile (an arc), the theory of which is much studied. The attack angle was assessed to be close to  $3.4^{\circ}$  within the swimming velocity range of  $2.1-3.3 \text{ m} \cdot \text{sec}^{-1}$ .