ТОМ 118 1998 ВЫП. 4

УДК 577.31

### © 1998 г. Е.В. РОМАНЕНКО, В.Г. ЯНОВ

# ПУЛЬСАЦИОННАЯ КОМПОНЕНТА СКОРОСТИ АКТИВНОГО ПЛАВАНИЯ ДЕЛЬФИНОВ

С помощью математической модели оценена пульсационная компонента скорости активного плавания дельфина под действием пульсирующей тяги. Показано, что она составляет доли процента. Результаты специально поставленного эксперимента подтвердили выводы теоретической модели. Даны рекомендации по выбору точки наблюдения на теле дельфина при измерении его скорости плавания.

#### введение

Измерение скорости плавания дельфинов в условиях неволи – процедура на первый взгляд не очень сложная. Обычно для этой цели применяют один из двух методов: метод киносъемки [2, 3, 5, 10] и метод микровертушки [1, 4, 9]. Мы пользовались также третьим методом, основанным на однозначной зависимости частоты срыва вихрей с обтекаемого цилиндра от скорости набегающего потока [4].

При первом методе осуществляют киносъемку дельфина, плывущего по прямой траектории в бассейне или вольере, затем проводят покадровый анализ, измеряя смещение четко определяемых точек на теле животного относительно неподвижной системы координат за известные интервалы времени.

При втором методе в определенной точке на теле дельфина закрепляют градуированную микровертушку и регистрируют электрические импульсы, генерируемые микровертушкой вследствие вращения ее подвижного элемента набегающим потоком воды. Зная частоту генерируемых импульсов, по градуировочной кривой (или по соответствующей таблице) можно оценить скорость движения дельфина. Строго говоря, в этом случае находят не скорость движения дельфина, а скорость обтекания его набегающим потоком воды в точке крепления микровертушки. Пренебрежение разницей между этими величинами может привести к ошибочным выводам. Последние замечания относятся также и к измерениям скорости движения дельфина третьим методом.

Ошибки возможны и при некорректном использовании кинематографического метода. Например, в работе [2] приведен график периодических изменений поступательной скорости дельфина, которые достигают 17–20% значения скорости. При этом частота изменений равна удвоенной частоте колебаний тела животного.

В работе [11] периодические изменения скорости движения дельфина, также найденные кинематографическим методом, достигают ±20% значения самой скорости. Однако частота изменений при этом совпадает с частотой колебаний тела животного. Для определения скорости движения дельфина в данной работе была выбрана точка перехода задней кромки спинного плавника в поверхность спины. Установленные значительные изменения скорости животного в течение одного периода колебания хвостовой лопасти свидетельствуют о больших величинах ускорения и замедления его движения. В частности, оценки, проведенные нами по данным работы [11, табл. 1 и 2], показали, что ускорение достигает 1,7 м/с². Такое ускорение может быть обеспечено только развиваемой дельфином тягой. В то же время согласно простейшему расчету

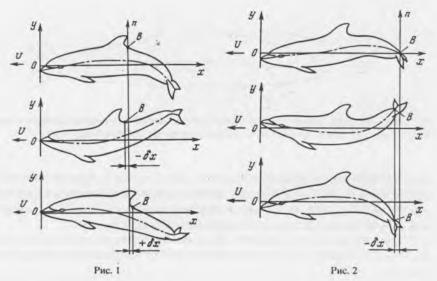


Рис. 1. Схема, поясняющая появление пульсационной компоненты скорости смещения точки тела дельфина, расположенной на его спине

Рис. 2. Схема, поясняющая появление пульсационной компоненты скорости смещения точки тела дельфина, расположенной вблизи его хвостового плавника

сила, требуемая для разгона дельфина массой 232 кг с ускорением  $1,7 \text{ м/c}^2$ , составляет 394,4 H, что почти в 5 раз больше реально развиваемой им тяги [11]. Результаты оценок самих авторов упомянутой работы были аналогичными и вызвали у них недоумение. Причина же получаемых значительных периодических изменений скорости плавания дельфинов состоит в том, что результаты измерений поступательной скорости дельфина содержат-методическую погрешность. Этот же упрек относится и к работе [2].

Ошибочен вывод о значительных колебаниях скорости, как с частотой, равной удвоенной частоте колебаний тела (в работе [2]), так и с частотой, равной частоте колебаний тела (в работе [11]).

Подобные ошибки являются следствием неудачного выбора точки на теле дельфина, смещение которой во времени используют для вычисления поступательной скорости животного. В работе [11] точка была выбрана в области перехода задней кромки спинного плавника в поверхность спины дельфина (рис. 1). В этом случае проекция смещения точки на направление движения изменяет свою величину с частотой колебаний тела дельфина. В работе [2] точка была выбрана на хвостовом плавнике, на его развилке (рис. 2). В этом случае проекция смещения точки на направление движения будет изменять свою величину с частотой, равной удвоенной частоте колебаний тела.

На рис. 1 показаны смещения точки B (точка перехода задней кромки спинного плавника в поверхность спины дельфина) в процессе активного движения дельфина. Отражены три фазы одного колебательного цикла движения животного: в первой фазе касательная к средней линии дельфина в области расположения точки B горизонтальна, во второй и третьей фазах – касательная наклонена под положительным (вторая фаза) и отрицательным (третья фаза) углом. Соответственно во второй фазе точка B сместилась вперед (на величину  $-\delta x$ ), а в третьей фазе назад (на величину  $+\delta x$ ) относительно вертикальной оси n, проведенной через точку B в первой фазе движения. При движении точки B вперед ее скорость в неподвижной системе координат будет больше средней скорости плавания дельфина, при движении же назад — меньше. Причем период изменения скорости будет равен периоду колебаний тела

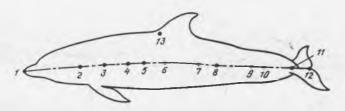


Рис. 3. Схема расположения точек на теле дельфина, скорость смещения которых измеряли кинематографическим методом. В точках 2–11 и 13 были закреплены присоски белого цвета

животного. В случае, представленном на рис. 2, точка B, находящаяся вблизи лопасти дельфина, дважды за период смещается вперед на величину  $-\delta x$  относительно линии n, проведенной через эту точку в момент, когда она пересекает ось x. В результате изменения скорости следуют с удвоенной частотой.

В подтверждение сказанного приведем результаты специально поставленного опыта по измерению поступательной скорости движения дельфина методом киносъемки.

#### МАТЕРИАЛ И МЕТОЛИКА

Опыты проводили на трех дельфинах афалинах: двух самках и одном самце. Одна самка имела длину 2,08 м и массу 180 кг, вторая — 3,36 м и 220 кг, самец — 2,12 м и 200 кг, соответственно. Кинематику дельфинов изучали в морском вольере кинематографическим методом. Морской вольер принадлежит Утришской морской станции Института проблем экологии и эволюции им. А.Н. Северцова РАН. Устройство вольера и методика киносъемки подробно описаны в работе [7].

Главная особенность опыта заключалась в том, что на теле животного были выбраны точки, наблюдение за которыми позволило определить оптимальные условия для оценки поступательной скорости дельфина с наименьшей погрешностью. Чтобы выбранные точки были хорошо видны на теле дельфина, их обозначили резиновыми присосками белого цвета (рис. 3, точки 2–11 и 13). Присоски 2–11 устанавливали на боку животного по его средней линии с заданным известным интервалом. Другие используемые в опыте точки тела дельфина – 1 и 12 (конец рострума, развилка хвостовой лопасти) четко определялись на кинограммах без маркировки.

# РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

На рис. 4 приведены графики скорости движения (dx/dt) различных точек тела дельфина на протяжении одного периода колебаний тела. На верхнем графике (а) даны усредненные значения в точках 1-8. Доверительные интервалы составляют две среднеквадратичные погрешности, доверительная вероятность - 95%. Четко выраженные периодические изменения скорости отмечены для точек 9–13 ( $\delta$ ,  $\delta$ ,  $\epsilon$ ,  $\delta$ ,  $\epsilon$ ). Причем период изменения скорости в точках 9-12 вдвое больше периода колебаний тела. Изменение скорости точки 12 от минимального до максимального значений составляет около 28%. Это согласуется с данными работы [2]. Период изменения скорости точки 13 равен периоду колебаний тела дельфина. Величина скорости при этом изменяется на 21%. Этот результат соответствует данным работы [11], хотя положения сравниваемых точек наблюдения не совсем совпадают. Однако картина смещения точек наблюдения в обоих случаях однотипна. В работе [11] на рис. 2 приведены графики изменений продольной компоненты скорости двух точек тела дельфина: кончика хвостовой лопасти и точки перехода задней кромки спинного плавника в поверхность спины, относительно близкой по положению к точке 13 на рис. 4, е настоящей работы. Эти графики хорошо согласуются с полученными нами

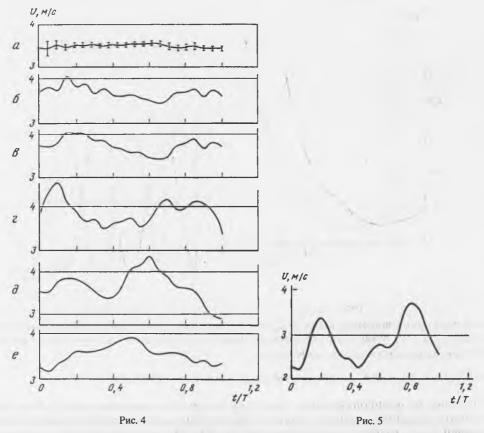


Рис. 4. Скорости смещения различных точек тела дельфина в зависимости от времени на протяжении одного периода колебаний в режиме равномерного движения: a – усредненные данные по точкам 1–8 на схеме рис. 3,  $\delta$  – точка 9,  $\epsilon$  – точка 10,  $\epsilon$  – точка 11,  $\delta$  – точка 12,  $\epsilon$  – точка 13,  $\epsilon$  – время,  $\epsilon$  – период колебаний

Рис. 5. Скорость смещения точки 12 тела дельфина в зависимости от времени при движении дельфина с ускорением около  $1,3 \text{ м/c}^2$ 

(рис. 4,  $\partial$ , e). Однако убедительного объяснения своим данным авторы работы [11] дать не смогли.

Изменения скорости точек 1-8 носят нерегулярный характер и не превышают как правило  $\pm 4\%$  средней скорости. Эти точки расположены в передней и средней частях тела дельфина на его средней линии и меньше других участвуют в колебательном движении.

Изменения скорости точек 9–13 (от минимального до максимального значений) еще более значительны в случае движения дельфина с ускорением. В частности, изменения скорости точки 12 при этом составляют ~ 47% от среднего значения (рис. 5).

Отсутствие заметных изменений скорости точек 1–8 объясняется характером амплитудной функции, приведенной на рис. 6 (по данным работ [6, 8–10]). Видно, что в этих точках амплитуда колебаний тела дельфина значительно меньше, чем в области хвоста (в точках 9–12). Поэтому здесь меньше всего выражены явления, по-казанные на рис. 1 и 2. Можно сказать, что оптимальными для измерений скорости движения дельфина являются точки 3–5, расположенные на средней линии его тела в области минимума амплитудной функции (рис. 6).

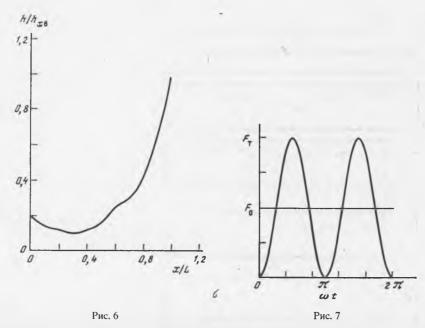


Рис. 6. Амплитудная функция дельфина:  $h/h_{x_0}$  – относительная амплитуда колебаний различных точек тела дельфина,  $h_{x_0}$  – амплитуда колебания хвостовой лопасти дельфина, x/L – относительное расстояние выбранных точек от кончика носа дельфина

Рис. 7. Схематическое представление функции тяги дельфина. Объяснение в тексте

Оценим пульсационную компоненту скорости плавания дельфина с помощью математической модели. Будем считать, что дельфин движется под действием пульсирующей силы, графическое представление которой дано на рис. 7. Очевидно, что частота пульсаций силы вдвое выше, чем частота биений хвоста дельфина, так как тяга положительна при движении хвоста и вверх и вниз. Пульсирующую тягу  $F_T$  дельфина (рис. 7) можно записать в форме

$$F_T = F_0 \left[ 1 + \sin \left( 2\omega t - \frac{\pi}{2} \right) \right],\tag{1}$$

где  $F_0$  — среднее по времени за период колебания тела значение тяги,  $\omega=2\pi f$ , f — частота биений хвоста, t — время. Уравнение движения тела дельфина вдоль горизонтальной оси скорости имеет вид

$$m\frac{dU}{dt} + F_D = F_T. (2)$$

Здесь m — масса тела дельфина,  $F_D$  — сила сопротивления воды движению животного, U — скорость движения. Силу сопротивления представим в виде

$$F_D = C_D \frac{\rho U^2}{2} S_b \,. \tag{3}$$

Здесь  $C_D$  – коэффициент сопротивления дельфина,  $\rho$  – плотность воды,  $S_b$  – площадь поверхности тела дельфина. Представим скорость движения дельфина U как сумму двух компонентов

$$U = U_0 + u, (4)$$

где  $U_0$  – постоянная составляющая скорости, u – пульсационная. Тогда уравнение 494

движения (2) можно переписать в виде

$$\frac{d(U_0 + u)}{dt} + \frac{A}{m} \left( U_0^2 + 2U_0 u + u^2 \right) - \frac{F_T}{m} = 0, \tag{5}$$

где введено обозначение

$$A = C_D \frac{\rho S_b}{2}. \tag{6}$$

Приведенные выше экспериментальные данные позволяют считать, что

$$U_0 \gg u$$
. (7)

В режиме движения с постоянной средней скоростью  $U_0$  средняя за период сила тяги уравновешивается силой сопротивления, т.е.

$$F_0 = C_D \, \frac{\rho U_0^2 S_b}{2} \,. \tag{8}$$

Учитывая условия (7) и (8), а также соотношение (1), получим окончательно

$$\frac{du}{dt} + \frac{2AU_0}{m}u - \frac{F_0}{m}\sin\left(2\omega t - \frac{\pi}{2}\right) = 0. \tag{9}$$

Это не что иное, как линейное дифференциальное уравнение вида

$$\frac{du}{dt} + p(t)u + q(t) = 0, (10)$$

которое имеет следующее решение:

$$u = e^{-\int p(t)dt} \left( C - \int q(t)e^{\int p(t)dt} dt \right). \tag{11}$$

Здесь

$$p(t) = \frac{2AU_0}{m} \tag{12}$$

И

$$q(t) = -\frac{F_0}{m} \sin\left(2\omega t - \frac{\pi}{2}\right). \tag{13}$$

Учитывая (12) и (13), решение (11) получим в виде

$$u = e^{-\left(\frac{2AU_0}{m}t + C_1\right)} \left[ C - \frac{F_0}{m} \frac{\left(\frac{2AU_0}{m}\right)\cos 2\omega t + 2\omega\sin 2\omega t}{\left(\frac{2AU_0}{m}\right)^2 + (2\omega)^2} e^{\left(\frac{2AU_0}{m}t + C_1\right)} + C_2 \right], \tag{14}$$

где C,  $C_1$  и  $C_2$  – постоянные интегрирования.

По прошествии достаточно большого времени пульсационная компонента скорости принимает вид

$$u = -\frac{F_0}{m} \frac{\left(\frac{2AU_0}{m}\right) \cos 2\omega t + 2\omega \sin 2\omega t}{\left(\frac{2AU_0}{m}\right)^2 + (2\omega)^2}.$$
 (15)

Для числовой оценки пульсационной компоненты скорости по формуле (15) воспользуемся данными работы [11] для Tursiops truncatus:

$$m$$
, кг  $S_b$ , м<sup>2</sup>  $f$ ,  $\Gamma$ ц  $U_0$ , м/с 232 2,16 1,11 2,35

Прежде всего оценим соотношение слагаемых в числителе и знаменателе второй дроби правой части соотношения (15):

$$\frac{2AU_0}{2m\omega} = \frac{C_D \rho S_b U_0}{2m\omega} = 0,0048. \tag{16}$$

Для коэффициента сопротивления мы приняли значение  $C_D = 0,003$  [10]. Результат оценки (16) показывает, что первые члены в числителе и знаменателе правой части формулы (15) пренебрежимо малы по сравнению со вторыми членами и ими можно пренебречь. Тогда формула (15) принимает окончательный вид

$$u = -\frac{F_0}{m} \frac{\sin 2\omega t}{2\omega}.$$
 (17)

Для численных оценок нас интересует амплитудное значение относительной величины пульсационной компоненты скорости, которую можно получить, разделив левую и правую части выражения (17) на  $U_0$  и воспользовавшись соотношением (8):

$$\left| \frac{u}{U_0} \right| = \frac{C_D \rho U_0 S_b}{4m\omega} \,. \tag{18}$$

Подставляя в эту формулу данные из работы [11], получим

$$\left| \frac{u}{U_0} \right| = 0,0024, \text{ или } 0,24\%.$$
 (19)

Конечный результат свидетельствует о том, что пульсационная компонента скорости плавания дельфина очень мала и, по-видимому, не может быть обнаружена традиционными методами. Вероятно, именно по этой причине на приведенном выше графике (рис. 4, a) не видно признаков гармонической пульсационной компоненты скорости плавания дельфина. Имеющуюся же нерегулярность (около  $\pm 4\%$ ) следует отнести за счет погрешностей измерений.

Таким образом, обнаруженные некоторыми исследователями пульсационные компоненты скорости плавания дельфинов, достигающие величины 17–20% средней скорости, по-видимому, являются результатом неправильного выбора точки наблюдения на теле животного. Чтобы избежать подобных ошибок, необходимо выбирать точку наблюдения, во-первых, на средней линии животного и, во-вторых, в передней части его тела, предпочтительнее даже на расстоянии приблизительно 0,3 длины тела от кончика поса.

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

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1. Егидис Б.М., Шакало В.М. // Бионика. 1971. № 5. С. 128.
- 2. Пятецкий В.Е., Каян В.П. // Бионика. 1975. № 9. С. 41.
- 3. Пятецкий В.Е., Каян В.П., Козлов Л.Ф., Семенов Б.Н. // Бионика. 1978. № 12. С. 55.