

РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК

УСПЕХИ  
СОВРЕМЕННОЙ БИОЛОГИИ

(ОТДЕЛЬНЫЙ ОТТИСК)

МОСКВА

УДК 577.31

© 1995 г. Е. В. РОМАНЕНКО

ОЦЕНКА ТЯГИ И КОЭФФИЦИЕНТА СОПРОТИВЛЕНИЯ  
ДЕЛЬФИНА

Анализ ряда работ, в которых оценены тяга и коэффициент сопротивления дельфина, выявил неточности, приведшие их авторов к ошибочным выводам о многократном превышении полученных значений над теоретическими и, как следствие этого, к заключению об отсутствии у дельфинов каких-либо механизмов уменьшения сопротивления. Устранение упомянутых неточностей дало цифры, которые удовлетворительно согласуются с теоретическими расчетами, и позволило сделать вывод о целесообразности дальнейших поисков объяснения парадокса Грея.

Гидродинамика дельфинов уже много лет привлекает внимание исследователей. Прежде всего их интересует, обладают ли дельфины в процессе плавания механизмами уменьшения сопротивления при числах Рейнольдса ( $Re$ ), превышающих критическое. В 1936 г. Грей [10] предположил наличие такого механизма, связанного с формированием на теле дельфина благожелательного (отрицательного) градиента динамического давления в процессе активного плавания. Позднее было высказано еще несколько гипотез: о демпфирующих свойствах кожного покрова [1, 12], о кожных и глазных выделениях, снижающих сопротивление [4], и др.

Помимо исследователей, признающих существование механизмов снижения сопротивления дельфина в процессе активного плавания и занятых поиском таких механизмов, есть и такие, которые считают, что никаких механизмов не существует (кроме ламинаризованной формы тела) и что дельфин обладает достаточным запасом мощности для обеспечения реальной скорости плавания. Такой вывод обычно делают в результате оценок тяги и коэффициента сопротивления дельфина на основе теории крыла (стационарной и нестационарной) и измеренных кинематических параметров плавания животного [8, 9]. Из рис. 1 видно, что большая часть оцененных значений сопротивления дельфина в несколько раз превышает теоретическое. Необходимо, однако, отметить, что этот метод оценок не может служить основанием для окончательных выводов. Доказательными могут быть лишь непосредственные измерения параметров пограничного слоя: уровня пульсаций скорости или давления, касательных напряжений, а также распределения динамического давления на теле дельфина в процессе его активного плавания. Только они позволят корректно оценить коэффициент сопротивления дельфина. Но даже использование упомянутого метода оценки тяги, развиваемой дельфином, при аккуратном учете всех допущений может позволить сформулировать выводы, противоположные тем, которые были сделаны. В качестве иллюстрации проанализируем работы [8, 18, 20], рассмотрев коэффициент сопротивления активно плывущего дельфина.

Уэбб [18] оценил коэффициент тяги ( $C_T$ ) активно плывущего дельфина на основе выводов стационарной [16] и двумерной нестационарной [14] теории крыла, а Фиш и Эйтс [8, 20] коэффициенты тяги и сопротивления дельфина на основе нестационарной теории трехмерного крыла полулунной формы (с удлинением, равным 8), совершающего малые колебания [7]. Расчетная формула, заимствованная Уэббом из работы [16], связывает тягу ( $E$ ) с кинематическими параметрами

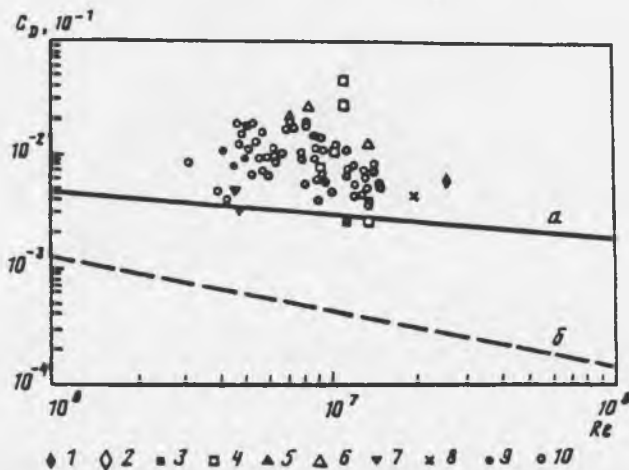


Рис. 1. Коэффициент сопротивления ( $C_D$ ) дельфинов разных видов в зависимости от числа Рейнольдса ( $Re$ ) [8]. Светлые значки — коэффициент сопротивления, оцененный с использованием кинематических параметров плавания животных, черные соответствуют измерениям на дельфинах, плывущих по инверсии или буксируемых.  $a$  и  $b$  — коэффициент сопротивления гладкой плоской пластины соответственно при турбулентном и ламинарном обтекании. 1 и 2 — *Delphinus delphis*; 3 и 4 — *Lagenorhynchus obliquidens*; 5 — *Phocoena phocoena*; 6 — *Phocoenoides dalli*; 7 — *Sotalia fluviatilis*; 8 — *Stenella attenuata*; 9 и 10 — *Tursiops truncatus*

$$E = 0,0175L^2U^2 [0,38Ln/U - 0,047] \quad (1)$$

Здесь  $L$ ,  $U$  и  $n$  — соответственно длина тела дельфина, скорость плавания и частота колебаний хвостовой лопасти.

В работах [7, 14] выводы теории представлены в форме графической зависимости  $C_T$  от приведенной частоты  $\sigma = \omega c/U$  при различных значениях параметра флюгирования  $\theta = Ua/\omega h$ , где  $\omega = 2\pi\zeta$ ;  $c$  — хорда крыла;  $a$  — угол, образуемый плоскостью крыла с горизонтальной осью координат;  $h$  — амплитуда колебаний. При известных кинематических параметрах хвостовой лопасти коэффициент сопротивления ( $C_D$ ) дельфина может быть оценен по формуле

$$C_D = (h/c)^2 C_T (S_T/S_B) \quad (2)$$

Здесь  $S_B$  и  $S_T$  соответственно смоченная поверхность тела и одной стороны хвостовой лопасти;  $(h/c)^2$  — параметр, введенный в работе [7], чтобы адаптировать выводы теории к случаю колебаний хвостовой лопасти дельфина с большой амплитудой. Кроме того, в параметре флюгирования с той же целью необходимо использовать величину  $\text{tg } a$  вместо  $a$  [6, 7]. Тогда он примет вид  $\theta = (U \text{tg } a)/\omega h$ .

Из табл. 1 видно, что расчетные значения тяговой мощности трех видов дельфинов (цифры без скобок) превышают теоретические соответственно в 6,3; 9,4 и 16 раз. Вычисления тяговой мощности проводили с использованием формулы

$$EU = 0,0175L^2U^3 [0,38Ln/U - 0,047] \quad (3)$$

Однако анализ способа получения формулы показывает, что численное выражение ее коэффициентов имеет значительные погрешности. Чтобы показать это, представим эту формулу в общем виде (без оценки численных коэффициентов)

$$EU = \rho A U^3 (C_a^* a_1 \nu a v - C_a^* a_1^2 / 2\pi \Lambda - C_{op}) / 2 \quad (4)$$

Здесь сохранены все обозначения (кроме скорости  $U$ ), принятые в работе [16];  $C_a^* a = 2\pi a / (1 + (2/\Lambda))$ ;  $\nu = ns/U$ ;  $a = 1,7$ ;  $C_{op} = 0,023$ ;  $n$  — частота колебаний;  $s = 0,13L$  — полуширина лопасти;  $\Lambda = 2$  — удлинение лопасти;  $a_1 = 10^\circ$  —

удлинение  $\frac{(2s)^2}{S_{x1}} = \frac{(0,26L)^2}{0,017L^2} =$

Тера  
 $410,9 \text{ Н} \rightarrow C_{\text{пр}} = 0,00039$

Таблица 1

Оценочные и теоретические значения тяговой мощности [19]

Вид	$L, \text{ см}$	$U, \text{ см/с}$	$n, \text{ с}^{-1}$	$EU, \text{ эрг/с}$	$C_{\text{п}}$	$S_{\text{в}}, \text{ см}^2$	$\langle EU \rangle_{\text{T}}, \text{ эрг/с}$	$EU/\langle EU \rangle_{\text{T}}$
<i>Delphinus bairdi</i>	170	430	1,8	$8,96(0,9) \cdot 10^9$	0,0031	11 560	$1,42 \cdot 10^9$	6,3(0,64)
<i>Phocoenoides dalli</i>	200	430	2,1	$18,0(1,92) \cdot 10^9$	0,003	16 000	$1,91 \cdot 10^9$	9,4(1,0)
<i>Lagenorhynchus obliquidens</i>	204	554(510)	3,9(2,8)	$61,8(3,96) \cdot 10^9$	0,0028	16 646	$3,96(0,99) \cdot 10^9$	16(1,28)

Примечание.  $S_{\text{в}} = 0,4 L^2$  — предположенное значение;  $C_{\text{п}}$  — теоретический турбулентный коэффициент трения. Цифры без скобок — данные из работы [18], в скобках приведены скорректированные значения величин.

максимальное значение угла атаки;  $\alpha$  — его текущее значение. Выпишем отдельно часть формулы (3), стоящую перед скобками:

$$0,0175L^2U^3 = \rho A_p U^3 / 2$$

где  $A_p = 0,034L^2$  — суммарная площадь двух сторон лопасти дельфина. Однако в создании тяги участвует только одна сторона лопасти. Следовательно, надо использовать в формуле половину величины  $A_p$ , для чего в эту часть формулы с целью ее корректировки надо ввести множитель  $K_1 = 0,5$ .

Исходное выражение для получения первого члена формулы (3) в скобках может быть записано в виде  $C_{\text{алав}}^* = 0,38Ln/U$ .

Не имея экспериментальных данных, Перри [16] выбрал произвольно амплитуду колебаний хвостовой лопасти ( $as = 0,221L$ ) и угол атаки ( $\alpha_1 = 10^\circ$ ). В настоящее время эти данные уже опубликованы. Например, амплитуда колебаний лопасти *Tursiops truncatus*, по данным работы [8], может быть представлена как  $h = (0,1 \pm 0,03)L$ . Отсюда видно, что Перри использовал величину амплитуды, в 2,2 раза превышающую реальную. Аналогично он поступил и с углом атаки (табл. 2).

Большинство данных об углах атаки, кроме результатов работы [8], удовлетворительно согласуются между собой. При углах атаки 12—19,5° возможен срыв потока с передней кромки лопасти и возникновение кавитации. Такие значения углов атаки представляют маловероятными. Если использовать значения угла атаки из табл. 2 как наиболее вероятные (кроме значений из работы [8]), то среднее значение будет равно 5,2°, а это почти в 2 раза меньше того, что предположил Перри. Учесть неточность формулы (3) за счет амплитуды колебаний и угла атаки можно путем введения в первый член формулы (4) (в скобках) коэффициентов  $K_2 = 0,45$  и  $K_3 = 0,52$ , а во второй коэффициент  $K_4 = 0,52$ .

При выводе своей формулы Перри принял удлинение крыла, равным 2, но сейчас уже известно, что удлинение хвостовой лопасти дельфина 4. Учет этого обстоятельства приводит к необходимости включения в первый член (в скобках) формулы (4) коэффициента  $K_4 = 1,33$  и во второй  $K_4 = 0,5$ .

Еще одно допущение безусловно приводит к завышению оценок тяги — это предположение об абсолютной жесткости крыла, тогда как хвостовая лопасть дельфина, особенно ее задняя кромка, обладает известной гибкостью. В работе [11] рассматривается нестационарная теория гибкого крыла, которая позволяет считать, что гибкость уменьшает тягу на 15%, если крыло изготовлено из резиноподобного материала, поэтому при вычислении тяги по приведенной выше формуле введем дополнительный множитель  $K_5 = 0,85$ .

Некоторую погрешность в формулу вносит также предположение, что  $\sin \gamma = \gamma$ , и  $\cos \gamma = 1$ , где  $\gamma$  — угол между касательной к траектории движения

Значения углов атаки, полученные экспериментальным путем

Вид	$\alpha_1^\circ$	$U$ , см/с	Ссылка
<i>Tursiops truncatus</i>	4—6	230	[2]
То же	3,4	235	[17]
»	3,6	430	[3]
»	19,5	200	[8]
»	12	600	[8]
<i>Sotalia guianensis</i>	8,8	240	[17]

крыла и горизонтальной осью. При бесконечно малых амплитудах колебаний крыла это справедливо, но амплитуду колебаний хвостовой лопасти нельзя считать малой. Для реальных амплитуд колебаний хвостовой лопасти дельфина угол  $\gamma$  составляет величину  $\sim 40^\circ$ . При этом ( $\sin \gamma/\gamma = 0,91$ , а  $\cos \gamma = 0,77$ , в связи с чем введем коэффициенты  $K_6 = 0,91$  и  $K_7 = 0,77$ ).

Поскольку мы не располагаем данными о зависимости профильного сопротивления лопасти от ее удлинения, воспользуемся его значением  $C_{ap} = 0,023$ , приведенным в работе [16].

Перепишем формулу (4) с поправочными коэффициентами

$$EU = K_1 K_2 (qA_l/2) U^2 (K_2 K_3 K_4 K_5 C_{ap}^* \alpha_1 \lambda a v - K_3^2 K_4^2 K_4' K_7 C_{ap}^* \alpha_1^2 / 2\pi \lambda - 0,023 K_7). \quad (5)$$

Учитывая все перечисленные поправки, формулу можно переписать в виде

$$EU = 0,0074 L^2 U^3 [(0,107 L n / U) - 0,023]. \quad (6)$$

Результаты вычислений по этой формуле представлены в табл. 1, из которой видно, что после учета неточностей и допущений, сделанных при выводе формулы, оцененные значения удовлетворительно согласуются с теоретическими. Необходимо отметить, что для *Lagenorhynchus obliquoidens*, используемые Ву [19] параметры скорости плавания и частоты колебаний хвоста заимствованы из работы Лэнга и Дейбела (цит. [19]) и отличаются от приведенных Уэббом. Согласно Ву,  $U = 510$  см/с, а  $n = 2,8$  с<sup>-1</sup>. Мы в своих оценках пользовались именно этими данными (см. табл. 1).

Уэбб [18] также проводит оценку коэффициента тяги дельфина *Lagenorhynchus obliquoidens* на основе выводов двумерной нестационарной теории крыла [14]. В табл. 3 приведены некоторые дополнительные параметры плавания дельфина, необходимые для оценки тяги, (часть параметров дана табл. 1). Хорошо видно, что двойная амплитуда колебаний хвоста по Уэббу составляет 60 см, тогда как Ву [19] и Ейтс [20], заимствуя эту же величину из той же работы Лэнга и Дейбела, что и Уэбб, приводят совсем другую цифру: она составляет 50 см. Мы в своих оценках также принимаем ее равной 50 см.

Данные об угле наклона хвостовой лопасти дельфина к горизонтальной оси в работе Лэнга и Дейбела, по-видимому, отсутствуют, о чем сообщает Ейтс [20]. (К сожалению, работа Лэнга и Дейбела нам недоступна.) В то же время Уэбб [18] определенно приводит величину этого угла (0,28 рад), называя его углом атаки. Поскольку нас интересует не угол атаки, то, следуя Ейтсу [20], мы примем величину угла наклона лопасти к горизонтальной оси равной 0,66 рад. Параметр флюгирования в этом случае будет равен 0,91, а не 0,21, как в работе [18].

Необходимое для оценки приведенной частоты значение хорды хвостовой лопасти дельфина у Уэбба [18] отсутствует, поэтому мы заимствуем его из работы [19]. (Хорда равна 19 см.) С учетом высказанных ранее замечаний по поводу скорости плавания дельфина и частоты колебаний его тела величина приведенной частоты равна 0,66 (вместо 0,40).

Параметры плавания дельфина *Lagenorhynchus obliquidens*

Вариант	$L$ , см	$\alpha$ , рад	$\theta$	$\sigma$	$C_T$	$S_T$ см <sup>2</sup>	$EU$ , эрг/с	$EU/(EU)_T$
Данные работы [18]	60	0,28	0,21	0,40	1,5	466	$4,03 \cdot 10^{10}$	10,2
Скорректированные данные [14]	50	0,66	0,91	0,66	0,12	466	$0,32 \cdot 10^{10}$	0,81
То же [7]	50	0,66	0,91	0,66	0,08	466	$0,21 \cdot 10^{10}$	0,53 - 0,62
		<del>0,72</del>	0,9	0,72	0,093			

Используя полученные значения приведенной частоты и параметра флюгирования, по графикам на рис. 9 из работы [14] и рис. 6 из работы [7] определяем коэффициент тяги. В случае двумерной теории [14] он равен 0,12, а трехмерной [7]—0,08. В последней колонке табл. 3 из приведенных отношений оцененной тяговой мощности и теоретической видно, что оцененная мощность меньше теоретической.

Оценить коэффициенты сопротивления первых двух видов дельфинов (см. табл. 1) можно по формуле

$$C_D = K_s K_{10} (2E/\rho S_b U^2). \quad (7)$$

Для третьего вида дельфина воспользуемся формулой

$$C_D = K_s K_s K_{10} (2E/\rho S_b U^2). \quad (8)$$

В обе формулы входят коэффициенты ( $K_s$  и  $K_{10}$  в первую) и ( $K_s$ ,  $K_s$  и  $K_{10}$  во вторую). Коэффициент  $K_s = 0,7$  учитывает влияние недостаточного заглубления дельфина в процессе экспериментов, описанных в работе Лэнга и Дейбела. Это видно из фрагмента, иллюстрирующего траекторию движения дельфина и приведенного в работе [19]. Коэффициенты  $K_s = 0,84$  и  $K_{10} = 0,72$  исключают профильное сопротивление тела и сопротивление плавников [8], так как нас интересует только коэффициент сопротивления трения тела дельфина (без плавников). Полученные значения коэффициентов сопротивления даны в табл. 4.

Ейтсом [20] проведена оценка коэффициента тяги дельфина *Lagenorhynchus obliquidens* по кинематическим данным той же самой работы Лэнга и Дейбела, что и в предыдущем случае, но с использованием выводов нестационарной трехмерной теории крыла [7]. Исходные кинематические данные мало отличаются от данных, приведенных в последней строке табл. 1 (в скобках) и табл. 3. Основная ошибка, допущенная Ейтсом [20], состоит в том, что при вычислении параметра флюгирования им использовано значение угла наклона лопасти к горизонтальной оси, тогда как должен был быть применен тангенс этого угла. Исправленное значение параметра флюгирования приведено табл. 3. Используя это значение параметра флюгирования и значение приведенной частоты (см. табл. 3), нетрудно по графику на рис. 6 из работы [7] определить коэффициент тяги:  $C_T = 0,08$ . Коэффициент сопротивления дельфина можно вычислить по формуле (2), взятой из работы [7].

Прежде чем определить коэффициент сопротивления дельфина, по формуле (2), необходимо ввести в эту формулу несколько множителей, учитывающих допущения, сделанные в теории крыла [7] (в этой работе рекомендована большая часть этих поправочных множителей). Множитель  $K_{11} = 0,9$  учитывает наличие хвостового стебля, уменьшающего тягу за счет снижения подсасывающей силы, множитель  $K_{12} = 0,96$  учитывает тот факт, что теория создана для случая крыла с удлинением 8, тогда как удлинение хвостовой лопасти дельфина равно 5,4; множитель  $K_{13} = 0,94$  учитывает, что предположение пропорциональности тяги величине  $(h/c)^2$  приводит к ее завышению, а множитель  $K_s = 0,85$  учитывает гибкость хвостовой лопасти. Введя эти множители и множители  $K_s$  и  $K_{10}$  в формулу (2) и использовав коэффициент тяги  $C_T = 0,08$ , получим  $C_D = 0,00113$  (предпо-

Таблица 4

Сравнение расчетных коэффициентов сопротивления с теоретическими, полученными соответствующими турбулентному обтеканию плоской пластины

Вид	$C_T$	$C_D$	$Re$
Delphinus bairdi	0,0031	0,00120	$7,03 \cdot 10^6$
Phocoenoides dalli	0,0030	0,00182	$8,60 \cdot 10^6$
Lagenorhynchus obliquidens	0,0028	0,00152	$1,04 \cdot 10^7$
То же	0,0028	0,00113	$1,04 \cdot 10^7$
»	0,0028	0,00106	$1,04 \cdot 10^7$

Примечание. В первых трех случаях расчет проведен по формулам (6) и (7), в четвертом — по формуле (8), в пятом — по формуле (9).

Таблица 5

Необходимые параметры и коэффициент сопротивления «усредненного» дельфина Tursiops truncatus

$U$ , см/с	$\alpha$ , рад	$\sigma$	$\theta$	$C_T$	$C_D$
200	0,45	0,84	0,48	0,42	0,0032
600	0,44	0,63	0,62	0,25	0,0023

Примечание.  $\alpha$  — угол наклона хвостовой лопасти дельфина к горизонтальной оси.

Таблица 6

Параметры плавания и коэффициенты сопротивления дельфинов

Вид	$U$ , см/с	$\alpha$ , рад	$h/c$	$\sigma$	$\theta$	$S_T/S_B$	$C_D$	Ссылка
Tursiops truncatus	230	0,56	1,06	0,71	0,83	0,036	0,0023	[2]
То же	235	0,44	1,47	0,50	0,86	0,046	0,0033	[17]
»	430	0,67	1,12	0,80	0,89	0,028	0,0014	[3]
Sotalia guianensis	240	0,37	1,46	0,48	0,67	0,048	0,0069	[17]

ледная строка табл. 4). В последней строке табл. 4 приведено значение  $C_D$  вычисленное по формуле

$$C_D = \eta K_1 K_2 K_3 K_4 K_5 C_T (W/U)^2 S_T/S_B \quad (9)$$

где  $\eta = 0,7$  — коэффициент полезного действия хвостового плавника дельфина;  $W = 520$  см/с — среднее значение скорости потока, обтекающего лопасть;  $C_T = 0,12$ . (Формула без коэффициентов и значения  $\eta$ ,  $W_T$  и  $S_B$  взяты из работы Уэбба [18].)

Работа [8] выгодно отличается от рассмотренных выше тем, что она содержит оригинальные экспериментальные данные. Однако, как и у Уэбба [18], в ней содержится серьезная ошибка, состоящая в том, что при вычислении параметра флюгирования автор использовал угол атаки хвостовой лопасти вместо тангенса угла наклона лопасти к горизонтальной оси. Кроме того, измеренные значения углов атаки неправдоподобно велики (см. табл. 2). Тем не менее оценим коэффициент сопротивления «усредненного» дельфина по данным Фиша [8]. Параметры такого дельфина представляют собой среднее арифметическое из параметров пяти дельфинов, изученных Фишем (все животные очень близки по морфо-

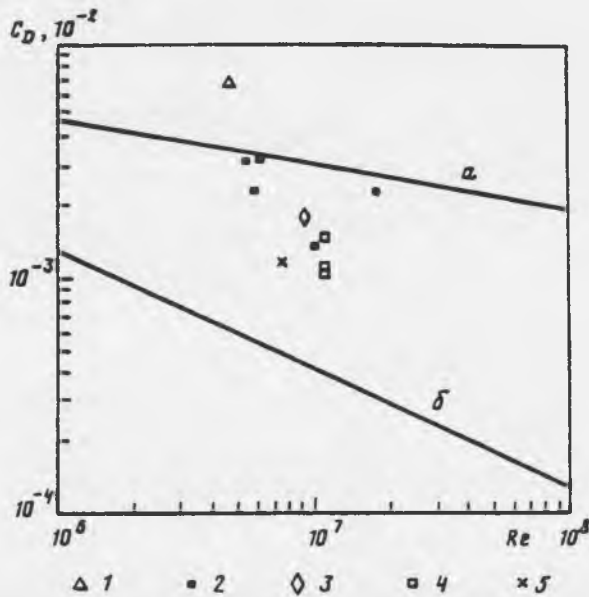


Рис. 2. Скорректированные значения коэффициента сопротивления ( $C_D$ ) дельфинов разных видов в зависимости от числа Рейнольдса ( $Re$ ).  $a$  и  $b$  — коэффициент сопротивления гладкой плоской пластины соответственно при турбулентном и ламинарном обтекании. 1 — *Sotalia fluviatilis*; 2 — *Tursiops truncatus*; 3 — *Phocoenoides dalli*; 4 — *Laagenorhinchus obliquidens*; 5 — *Delphinus bairdi*

метрическим данным):  $L = 261$  см;  $S_p = 27\,000$  см<sup>2</sup>; ширина лопасти  $2s = 66$  см;  $S_T = 1070$  см<sup>2</sup>;  $\Lambda = 4,06$ . Оценку проведем для двух значений  $U = 200$  и  $600$  см/с, которым соответствуют углы атаки  $19,5$  и  $12^\circ$  и частоты колебаний тела  $1,21$  и  $2,7$  с<sup>-1</sup>. При указанных углах атаки заметным становится индуктивное сопротивление хвостовой лопасти, которое должно быть исключено из общего сопротивления дельфина и которое мы оценим по формуле, взятой из работы [3]:

$$X_i = \rho \Lambda a^2 U^2 S_T (1 + 3\omega^2 h^2 / 4U^2) / [\Lambda^2 + 4]^{0,5} + 2R.$$

Результаты вычислений представлены в табл. 5. При вычислении коэффициентов сопротивления в ней приняты те же поправочные множители, что и в предыдущем случае, при этом множитель  $K_p$ , учитывающий заглупление, принят равным  $0,48$ , как в работе [8]. Учтено также индуктивное сопротивление, оцененное по приведенной выше формуле.

В дополнение к полученным результатам приведем оценки (табл. 6) коэффициентов сопротивления дельфинов по данным авторов [2, 3, 17], сделанные на основе нестационарной теории трехмерного крыла [7]. В процессе вычислений коэффициентов сопротивления по формуле (2) нами учитывались все те поправочные коэффициенты, что и при предыдущих оценках.

Скорректированные сводные данные (рис. 2) позволяют сделать следующие выводы.

1. Коэффициенты сопротивления дельфина, вычисленные с учетом поправок, удовлетворительно согласуются с теоретическими для плоской пластины.

2. Полученные результаты не позволяют говорить об отсутствии у дельфина механизмов снижения сопротивления. Скорее всего они дают возможность надеяться на наличие у дельфина таких механизмов.

3. Для того, чтобы можно было сделать определенные выводы о наличии у дельфина механизмов снижения сопротивления, необходимы прямые измерения характера обтекания дельфина и тонкой структуры пограничного слоя.

4. Полученные результаты достаточно условны, так как не учтен ряд допу-



щений, которые трудно или невозможно представить в количественной форме. К их числу относятся: неопределенность положения оси вращения хвостовой лопасти дельфина; отличие формы лопасти дельфина от формы теоретических крыльев; отсутствие точных данных о глубине, на которой плавал дельфин в процессе экспериментов; предположительный характер и значительный разброс некоторых параметров (углов атаки и наклона лопасти к горизонтальной оси).

Следует отметить также, что существуют теоретические модели [5, 13], отличные от использованных в рассмотренных работах [7, 14] и приводящие к несколько иным результатам.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского Фонда фундаментальных исследований.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бабенко В. В., Козлов Л. Ф., Першин С. В. // Биомимика. 1972. № 6. С. 84.
2. Каяк В. П. // Биомимика. 1979. № 13. С. 9.
3. Романенко Е. В. Теория плавания рыб и дельфинов. М.: Наука, 1986. 152 с.
4. Ускова Е. Т., Равеский В. С., Мамот Л. Н., Усков И. А. // Биомимика. 1975. № 9. С. 90.
5. Ahmadi A., Widnall S. E. // J. Fluid Mech. 1985. V. 153.
6. Chopra M. G. // J. Fluid Mech. 1976. v. 74. Pt 1. p. 161.
7. Chopra M. G., Kambe T. // J. Fluid Mech. 1977. V. 79. p. 49.
8. Flsh F. E. // J. Exptl Biol. 1993. V. 185. P. 179.
9. Flsh F. E., Hui C. A. // Mammal Rev. 1991. V. 21. № 4. P. 181.
10. Gray J. // J. Exptl Biol. 1936. V. 13. P. 1.
11. Katz J., Weihs D. // J. Fluid Mech. 1979. V. 90. № 4. P. 713.
12. Kramer M. O. // New Scientist. 1960. V. 7. № 181. P. 1118.
13. Lan C. E. // J. Fluid Mech. 1979. V. 93. № 4. P. 747.
14. Lighthill M. J. // Rev. Fluid Mech. 1969. V. 1. P. 413.
15. Norris K. S., Prescott J. H. // Univ. Calif. Publ. Zool. 1961. V. 63. P. 291.
16. Parry D. A. // J. Exptl Biol. 1949. V. 26. № 1. P. 24.
17. Videler J. J., Kamermans P. // J. Exptl Biol. 1985. V. 119. P. 265.
18. Webb P. W. // Bull. Fish Res. Board Canada. 1975. V. 190. P. 1.
20. Yates G. T. // Fish biomechanics/Eds Webb P. W., Weihs D. N. Y.: Praeger, 1983. P. 177.

Институт эволюционной морфологии  
им. А. Н. Северцова  
РАН, Москва

R. V. ROMANENKO

#### ASSESSMENT OF TRACTION AND RESISTANCE COEFFICIENT IN DOLPHIN

*Institute of Animal Evolutionary Morphology and Ecology,  
Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia*

An analysis of the works devoted to assessing the traction and resistance coefficient in dolphin has revealed some inaccuracies which have led to erroneous conclusions of the repeated excess of the obtained data over the theoretical ones. The latter has given the opportunity to charge of the absence of some mechanisms to decrease the resistance of dolphin. Elimination of the called inaccuracies has given the values which correlate well with theoretical calculations and allows to conclude of the advisability to continue searching for explanation of the Grey's paradox.