

ДОКЛАДЫ  
АКАДЕМИИ НАУК СССР

1981

ТОМ 261 № 2

(ОТДЕЛЬНЫЙ ОТТИСК)

Е.В. РОМАНЕНКО

# РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ДИНАМИЧЕСКОГО ДАВЛЕНИЯ НА ТЕЛЕ АКТИВНО ПЛЫВУЩЕГО ДЕЛЬФИНА

(Представлено академиком В.Е. Соколовым 20 I 1981)

В 1936 г. английский зоолог Джеймс Грей [1] высказал предположение, что критическое число Рейнольдса у активно плывущего дельфина должно быть выше, чем у дельфина, плывущего по инерции, или у жесткой модели, имеющей форму дельфина. Причиной этого мог быть отрицательный градиент давления на теле активно плывущего дельфина, наличие которого Грей предположил, исходя из умозрительных и весьма наивных соображений. Тем не менее гипотеза Грея, по-видимому, верна, о чем свидетельствуют результаты настоящей работы.

В процессе активного плавания тело дельфина совершает поперечные колебания, амплитуда которых нарастает от головы к хвосту. Это так называемая локомоторная волна, обуславливающая возникновение тяги. Можно показать, что локомоторная волна приводит также к формированию отрицательного градиента давления вдоль тела дельфина в направлении от головы к хвосту, причем величина его вполне достаточна для существенного повышения критического числа Рейнольдса.

В первом приближении можно считать, что тело дельфина имеет цилиндрическую форму, причем сечение тела мало меняется по длине. В этом случае распределение давления на поверхности тела определяется известным соотношением [2]

$$(1) \quad P - P_{\infty} = \frac{\rho v_y^2}{2} \left( 1 - 4 \sin^2 \theta \right) + \frac{\rho \cos \theta}{R} \frac{d}{dt} (R^2 v_y);$$

здесь  $v_y = v_y(x, y)$  — скорость поперечного движения тела,

$$(2) \quad v_y = \frac{\partial \eta}{\partial t} + V \frac{\partial \eta}{\partial x},$$

$R$  и  $\theta$  — координаты точек поверхности тела,  $\rho$  — плотность воды,  $\eta(x, t)$  — амплитуда поперечных колебаний тела,  $V$  — продольная скорость тела.

В выражении (1) неизвестной величиной является скорость поперечных движений тела. Эту величину можно определить, если известен закон деформации тела. В работе [3] предложен закон деформации тела дельфина в процессе активного плавания в виде

$$(3) \quad \eta = \eta_1 \left[ K_r - 1 + \exp \left[ \alpha \left( \frac{x}{L_p} \right)^\gamma \right] \right] \sin \omega \left[ t - \frac{x}{C_r(1 + bx)} \right];$$

здесь  $\eta_1$  — амплитуда колебаний хвоста,  $K_r$  — отношение амплитуд колебаний головы и хвоста,  $\omega$  — круговая частота,  $t$  — время,  $C_r$  — значение фазовой скорости локомоторной волны в области головы,  $\gamma$  — показатель степени нарастания амплитуды локомоторной волны,  $b$  — параметр, характеризующий зависимость фазовой скорости локомоторной волны от координаты в системе координат, связанной с телом животного,  $\alpha = \ln(2 - K_r)$ . Расположение тела дельфина в принятой системе координат показано на рис. 1.

Представляя выражение (1) в безразмерном виде и усредняя по времени, получим

$$(4) \quad \left\{ \frac{P - P_{\infty}}{\frac{1}{2} \rho V^2} \right\} = \frac{\{v_y^2\}}{V^2} (1 - 4 \sin^2 \theta).$$

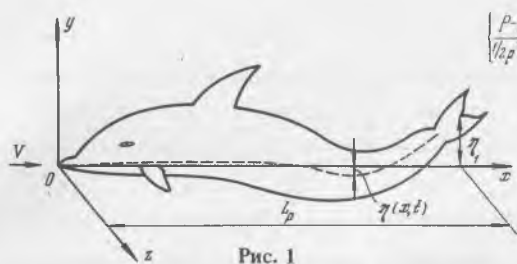


Рис. 1. Расположение дельфина в системе координат

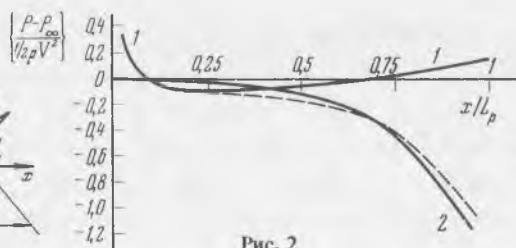


Рис. 2

Рис. 2. Распределение динамического давления на боковой поверхности тела дельфина

Рис. 3. Распределение форм-параметра профиля скоростей в пограничном слое на боковой поверхности тела дельфина

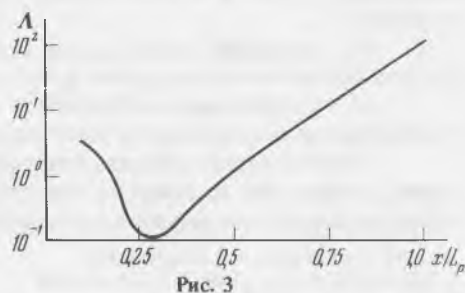


Рис. 3

Используя принятый закон деформации тела дельфина (3), выражение (4) окончательно можно записать в виде

$$(5) \quad \left\{ \frac{P - P_\infty}{\frac{1}{2}\rho V^2} \right\} = \left( \frac{\omega^2 \eta_1^2}{2V^2} \left[ 1 - \frac{V}{C_T (1 + bx)^2} \right]^2 \left[ K_T - 1 + \exp \left[ \alpha \left( \frac{x}{L_p} \right)^\gamma \right] \right]^2 + \right. \\ \left. + \frac{\alpha^2 \gamma^2 \eta_1^2}{2L_p^2} \left[ \frac{x}{L_p} \right]^{2\gamma-2} \exp \left[ 2\alpha \left( \frac{x}{L_p} \right)^\gamma \right] \right) (1 - 4 \sin^2 \theta).$$

В качестве примера рассчитаем распределение давления на теле дельфина афалины в режиме плавания, который, по мнению некоторых исследователей [4], считается предпочитаемым дельфинами. Необходимые для расчета кинематические параметры, соответствующие предпочитаемому режиму плавания, возьмем из работ [5, 6], в которых эти параметры получены экспериментальным путем (табл. 1).

Результат расчета распределения динамического давления на боковой поверхности тела дельфина афалины (при  $\theta = \pm \pi/2$ ) показаны на рис. 2 (кривая 2). На том же рисунке (кривая 1) показано распределение динамического давления на теле вращения, наиболее подобном телу дельфина. Эти данные взяты из работы [7] и соответствуют модели № 28. Штриховой линией на рис. 2 показано суммарное давление, вычисленное в предположении выполнимости принципа аддитивности. Обращает внимание монотонно падающий характер функции суммарного давления, что свидетельствует о наличии отрицательного градиента давления на всем теле дельфина от головы до хвоста, причем в области головы дельфина и в области хвостового стебля отрицательный градиент давления значительно больше, чем в средней части тела.

Оценим значение форм-параметра профиля скоростей в ламинарном пограничном слое на теле дельфина, определяемого соотношением [8]

$$(6) \quad \Lambda = - \frac{\delta^2}{\nu \rho V} \frac{dP}{dx},$$

где  $\nu$  — кинематическая вязкость,  $\delta$  — толщина пограничного слоя. На рис. 3 показано распределение форм-параметра профиля скоростей в пограничном слое на теле

Таблица 1

$\eta_1/L_p$	$f, c^{-1}$	$V/L_p, c^{-1}$	$b, m^{-1}$	$\gamma$	$L_p, m$	$K_r$	$V/C_r$
0,22	1,1	0,65	0,23	4,6	2,24	0,22	0,95

дельфина. Характер распределения форм-параметра позволяет сделать следующие выводы:

1) у дельфина должно иметь место повышение критического числа Рейнольдса, рассчитанного по длине тела, в 3–4 раза;

2) турбулизация пограничного слоя должна начинаться в средней части тела дельфина, где форм-параметр имеет наименьшие значения.

Наличие отрицательного градиента давления на теле активно плывущего дельфина, а также его влияние на тонкую структуру турбулизированного пограничного слоя уже имеет экспериментальное подтверждение [9, 10].

Институт эволюционной морфологии  
и экологии животных им. А.Н. Северцова  
Академии наук СССР, Москва

Поступило  
10 II 1981

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Gray J. — J. Exp. Biol., 1936, vol. 13, № 2, p. 192.
2. Логвинович Г.В. Гидродинамика течений со свободными границами. Киев, 1969.
3. Романенко Е.В. — ДАН, 1980, т. 235, № 5.
4. Першин С.В. — Бионика, 1970, т. 4, с. 31.
5. Пятецкий В.Е., Каян В.П. — Бионика, 1975, т. 9, с. 41.
6. Романенко Е.В. — ДАН, 1980, т. 253, № 3, 741.
7. Алексеева Т.Е., Громов В.П., Дмитриева А.Ф. и др., Расчет характеристик ламинарного пограничного слоя на телах вращения. Новосибирск, 1968.
8. Шлихтинг Г. Теория пограничного слоя. М., 1974.
9. Романенко Е.В., Янов В.Г. — Бионика, 1973, т. 7, с. 52.
10. Козлов Л.Ф., Шакало В.М. — Бионика, 1973, т. 7, с. 50.