

ОБН
I2048

АКАДЕМИЯ НАУК УКРАИНСКОЙ ССР
ИНСТИТУТ ГИДРОДИНАМИКИ

БИОНИКА

×

РЕСПУБЛИКАНСКИЙ МЕЖВЕДОМСТВЕННЫЙ СБОРНИК НАУЧНЫХ ТРУДОВ

ОСНОВАН В 1969 г.

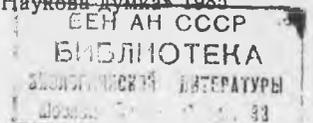
ВЫПУСК 19

КИЕВ НАУКОВА ДУМКА 1985

СОДЕРЖАНИЕ

<i>Логвинович Г. В.</i> О колебаниях тела в жидкости с учетом ее сжимаемости	3
<i>Козлов Л. Ф.</i> Математические и биологические модели плавания водных животных	7
<i>Козлов Л. Ф., Горячая Г. А., Королев Ю. Н.</i> Опыт исследования биоэнергетики черноморских дельфинов	25
<i>Романенко Е. В.</i> О законе деформации тела активно плывущей рыбы или дельфина	38
<i>Пятецкий В. Е., Хатунцев В. Н.</i> Об эффективности двигательного комплекса китообразных	43
<i>Хатунцев В. Н.</i> Особенности создания тяги на модели крыльцевого движителя в косом потоке	47
<i>Васильев А. С., Ильичев А. Ф., Михеев Г. Н.</i> Некоторые аспекты гидродинамического сопротивления рыб и их моделей	50
<i>Першин С. В.</i> О регулировании структурной организации тела и локомоторных органов организмов и гидробионическом моделировании оптимальных профилей	56
<i>Грунтфест Р. А., Дерезина Н. П.</i> Пространственная задача о колебании ласты переменной жесткости в потоке жидкости	68
<i>Тайц О. Г.</i> Осесимметричные каверны	73
<i>Мовчан В. Т.</i> О коэффициенте турбулентной вязкости в двухпараметрической $k-\varepsilon$ -модели	80
<i>Николайчук Л. А., Вронский А. А., Агарков Г. Б.</i> Морфо-функциональный анализ межмышечных костей леща, густеры и плотвы	82

© Издательство «Наукова думка» 1985



дельфина — травмирует животное, изменяет характер дыхания и вызывает повышение энергозатрат.

Методика расчета уровня энергетических затрат по данным легочной вентиляции (зарегистрированной на осциллографе посредством вертушки) имеет некоторые преимущества: сопротивление дыханию существенно уменьшается и практически сводится к нулю; крепление посредством присосок не травмирует область дыхала и не сдавливает внутренние органы животного; представляется возможным регистрировать легочную вентиляцию дельфина во время плавания.

Таким образом, определение энергетических затрат по данным легочной вентиляции, зарегистрированной посредством вертушки, более физиологично и приемлемо для дельфинов.

Наряду с преимуществами у второй методики имеются недостатки — полученная информация менее полная, чем при применении методики Дугласа—Холдена, поскольку отсутствуют данные о качественном составе выдыхаемого воздуха.

Методика измерения энергетических затрат по данным теплового потока представляется наиболее перспективной, так как в настоящее время это единственная возможность прямого определения энергетических затрат дельфина как в покое, так и в движении. Недостатки третьей методики заключаются в том, что возникают определенные трудности при определении эквивалентных поверхностных дельфинов.

В результате проведенных испытаний биоэнергетики черноморских дельфинов были сделаны следующие выводы.

Только совокупность примененных методов исследования энергетического обмена у дельфинов достаточно информативна.

Предложенные нами крепления аппаратуры к телу животного надежны, не травмируют животное и практически не нарушают естественной локомоции при плавании на сравнительно небольших скоростях.

При выработке у дельфинов пищевых условных рефлексов необходимо строго соблюдать последовательность этапов работы. Наиболее эффективна поощрительная система дрессировки.

Сроки приручения, выработки и закрепления пищевых условных рефлексов зависят от типологических особенностей животных. Проведенные испытания указывают, что для приручения дельфина к условиям эксперимента, выработки и закрепления пищевых условных рефлексов, для приручения к плаванию на различной скорости с аппаратурой необходима длительная, не менее двух месяцев, ежедневная работа с животными.

Максимальная мощность на единицу веса, развиваемая в покое и плывущим дельфином, в основном зависит от продолжительности нагрузки и сопоставима с соответствующей величиной для хорошо тренированных спортсменов.

УДК 591.524.1;591.177

Е. В. РОМАНЕНКО

О ЗАКОНЕ ДЕФОРМАЦИИ ТЕЛА АКТИВНО ПЛЫВУЩЕЙ РЫБЫ ИЛИ ДЕЛЬФИНА

До настоящего времени не существует достоверных данных о законе деформации тела активно плывущей рыбы или дельфина. В разное время исследователи предлагали аналитические функции, которые с их точек зрения наилучшим образом аппроксимируют упомянутый закон. В частности, в [7] указано, что закон деформации тела рыбы лучше всего описывается функцией

$$y(x) = (c_0 + c_1x + c_2x^2) \cos(\omega t - kx), \quad (1)$$

где c_0 , c_1 и c_2 — постоянные коэффициенты; $k = \omega/c$ — волновое число, ω — круговая частота, c — фазовая скорость локомоторной волны, распространяющейся от головы к хвосту — величина постоянная. Для постоянных коэффициентов c_0 , c_1 и c_2 приводятся следующие численные значения: $c_0 = 0,023$; $c_1 = 0,042$; $c_2 = 0,034$. В [5] автор приводит иные значения численных коэффициентов: $c_0 = 0,016$; $c_1 = 0,028$; $c_2 = 0,035$ и относит их к плавающему лососю.

Для активно плавающих дельфинов (азовок и белобочек) закон деформации тела предложен в [4] в следующем виде:

$$A = A_r e^{\beta x} \cos \omega \left(t - \frac{x}{c} \right). \quad (2)$$

Здесь A — вертикальное отклонение любой точки тела; x — расстояние вдоль тела; t — текущее время, c — скорость распространения локомоторной волны вдоль тела; $\omega = 2\pi/T$, T — период колебания; A_r — максимальная амплитуда поперечных колебаний носовой части тела; β — фактор, характеризующий быстроту нарастания амплитуды колебаний вдоль тела от головы к хвосту и являющийся функцией скорости движения дельфина.

Покажем, что β не является независимым параметром движения дельфина и может быть вычислен из граничного условия задачи о колебаниях тела животного. Действительно, в точке $x = l$ имеем

$$A_{x=l} = A_r e^{\beta l}. \quad (3)$$

Временной множитель пока опускаем. Здесь l — длина тела дельфина. Отсюда можно получить

$$\beta = \frac{1}{l} \ln \frac{A_{x=l}}{A_r}. \quad (4)$$

Тогда, подставляя это выражение в (2), получаем

$$A = A_r e^{\frac{x}{l} \ln \frac{A_{x=l}}{A_r}} \cos \omega \left(t - \frac{x}{c} \right) = A_r \left(\frac{A_{x=l}}{A_r} \right)^{\frac{x}{l}} \cos \omega \left(t - \frac{x}{c} \right). \quad (5)$$

Из (5) видно, что быстрота нарастания амплитуды колебаний вдоль тела дельфина от головы к хвосту однозначно определяется соотношением амплитуд колебаний носа и хвоста, что маловероятно.

Более того, можно показать, что представление закона деформации тела рыбы или дельфина в форме (1) или (2) приводит к физическому противоречию. Для этого оценим величину тяги, развиваемую рыбой, в гидродинамический КПД по теории Лайтхилла [6]. Соответственно получим

$$\{P\} = \frac{1}{2} \rho A(x)_{x=l} \left\{ \left(\frac{\partial h}{\partial t} \right)^2 - U^2 \left(\frac{\partial h}{\partial x} \right)^2 \right\}_{x=l}, \quad (6)$$

$$\{\eta\} = \frac{\{P\} \cdot U}{\{W\}} = \frac{\left\{ \left(\frac{\partial h}{\partial t} \right)^2 - U^2 \left(\frac{\partial h}{\partial x} \right)^2 \right\}_{x=l}}{2 \left\{ \frac{\partial h}{\partial t} \left(\frac{\partial h}{\partial t} + U \frac{\partial h}{\partial x} \right) \right\}_{x=l}}. \quad (7)$$

Фигурные скобки обозначают усреднение по времени. Система координат, в которой Лайтхиллом получены эти выражения, связана с телом рыбы, причем, начало координат совмещено с передним концом тела, длина которого равна l . Ось x направлена по оси тела от головы к хвосту. В приведенных выражениях величина $\rho A(x)$ представляет собой присоединенную массу тела рыбы на единицу ее длины, когда тело совершает колебания в направлении, перпендикулярном оси x ; ρ — плотность воды; $A(x)$ — площадь поперечного сечения тела рыбы;

U — скорость рыбы в направлении отрицательных значений x ; $h(t, x)$ — величина отклонения любой точки тела рыбы в поперечном направлении в процессе колебаний; t — время; $\{W\}$ — среднее за период значение мощности, развиваемой телом в процессе движения.

Примем закон деформации тела рыбы в наиболее общей форме с точки зрения амплитуды функции

$$h(x, t) = h_0(x) \cos \omega \left(t - \frac{x}{c} \right). \quad (8)$$

Здесь $h_0(x)$ — любая дифференцируемая функция. Таким образом, мы охватываем оба случая представления закона деформации (1) и (2).

Подстановка (8) в (6) в точке $x=l$ при условии стремления скорости локомоторной волны c к скорости движения тела u ($c \rightarrow u$) дает

$$\{P\} \rightarrow -\frac{1}{4} \rho A(x)_{x=l} U^2 \left(\frac{\partial h_0}{\partial x} \right)_{x=l}^2, \quad (9)$$

оценивая при этом КПД, получаем

$$\{\eta\} = \frac{\omega^2 h_0^2 \left(1 - \frac{U^2}{C^2} \right) - U^2 \left(\frac{\partial h_0}{\partial x} \right)_{x=l}^2}{2\omega^2 h_0^2 \left(1 - \frac{U}{C} \right)} \rightarrow -\infty. \quad (10)$$

Тяга оказывается отрицательной, а КПД стремится к минус бесконечности. В этом и заключается физическое противоречие. Можно было бы отнести это на счет ограничений теории Лайтхилла, но проверка показывает, что практически все существующие теории плавания рыб, в которых решается пространственная задача [1, 6, 9], или плоская задача, учитывающая конечную толщину обтекаемого профиля [8], приводят к аналогичному результату. По-видимому, дело не в теории, а в ограниченности наших представлений о реальном законе деформации тела рыбы в процессе активного плавания.

Рассмотрим результаты нашей оценки тяги (9) и КПД (10). Видно, что противоречия можно избежать, если принять, что у рыб

$$\left(\frac{\partial h_0}{\partial x} \right) = 0, \quad (11)$$

т. е. имеет место чисто «угревидный» способ плавания. Однако известно, что реально ни одна рыба не плавает таким способом, даже угорь. Можно также предположить, что у реальных рыб выполняется условие (11) только в одной точке $x=l$, т. е. на кромке хвоста. Этого достаточно, чтобы исключить противоречие. Именно такое условие и поставил Лайтхилл [6] в результате поисков оптимальной формы колебаний тела рыбы, при которой КПД стремился бы к 1 (при стремлении C к U). По поводу этого условия трудно что-либо сказать, так как экспериментальных данных, подтверждающих его, нет и получить их, по-видимому, трудно.

Но есть еще одна возможность исключить упомянутое физическое противоречие [3]. Достаточно предположить, что фазовая скорость локомоторной волны, распространяющейся по телу рыбы или дельфина в процессе активного плавания, не остается постоянной, а зависит от координаты в системе координат, связанной с телом животного*. В этом случае закон деформации тела рыбы или дельфина можно представить в общем виде следующим образом

$$h(x, t) = h_0(x) \sin [\omega t - k(x)x]. \quad (12)$$

* Это предположение возникло в результате обсуждения проблемы плавания рыб с профессором К. А. Наугольных. Автор считает своим приятным долгом выразить благодарность профессору К. А. Наугольных и С. Г. Пушкову за ценные советы.

Здесь $k(x)$ — пока неизвестная функция. Связь между фазовой скоростью локомоторной волны и волновым числом можно получить из уравнения фазы

$$\omega t - k(x)x = \varphi = \text{const.} \quad (13)$$

Дифференцируя его по t , получаем

$$\omega - \frac{\partial k}{\partial x} x \frac{dx}{dt} - k(x) \frac{dx}{dt} = 0. \quad (14)$$

Фазовую скорость локомоторной волны полагаем в виде

$$\frac{dx}{dt} = C(x). \quad (15)$$

Учитывая это, из (14) получаем

$$\omega - \frac{\partial k}{\partial x} x C(x) - k(x) C(x) = 0. \quad (16)$$

Для того, чтобы можно было проинтегрировать дифференциальное уравнение (16), необходимо задать зависимость $C(x)$ в явном виде. До сих пор исследователи полагали, что $C = \text{const}$. В качестве следующего приближения примем линейную форму зависимости

$$C(x) = C_r [1 + bx], \quad (17)$$

где C_r — фазовая скорость локомоторной волны на переднем конце тела животного; b — постоянный пока неизвестный коэффициент.

Тогда можно записать

$$\omega - \frac{\partial k}{\partial x} x C_r (1 + bx) - k(x) C_r (1 + bx) = 0. \quad (18)$$

Интегрирование этого уравнения дает

$$k(x) = \frac{k_0 \ln(1 + bx)}{bx}, \quad (19)$$

где

$$k_0 = \omega / C_r. \quad (20)$$

Видно, что волновое число имеет довольно сложный вид. Однако легко показать, что в предельном случае, когда $b \rightarrow 0$ и $C(x) \rightarrow C_r = \text{const}$, волновое число описывается выражением, совпадающим с формулой (20). Это обстоятельство может служить доказательством корректности выражения (19) и метода его получения.

Что касается вида функции $h_0(x)$ в выражении (12), то, исходя из очевидных данных опыта, которые сводятся к тому, что амплитуда локомоторной волны рыбы или дельфина монотонно нарастает от головы к хвосту, ее можно аппроксимировать экспонентой с минимальным числом неопределенных параметров

$$h_0(x) = h_{xв} [K_r - 1 + e^{\alpha(\frac{x}{l})^\gamma}]. \quad (21)$$

Тогда окончательно закон деформации можно представить в виде

$$h(x, t) = h_{xв} [K_r - 1 + e^{\alpha(\frac{x}{l})^\gamma}] \sin \left[\omega t - \frac{k_0 \ln(1 + bx)}{b} \right]. \quad (22)$$

Здесь k_r — отношение амплитуд колебаний головы и хвоста животного; γ — параметр, характеризующий степень нарастания амплитуды локомоторной волны; l — длина тела; $h_{xв}$ — амплитуда колебаний хвоста.

Коэффициент α легко может быть выражен через k_r из граничного условия. Действительно, амплитуда колебаний хвоста при $x = l$ должна быть равна $h_{xв}$, т. е.

$$k_r - 1 + e^\alpha = 1, \quad (23)$$

откуда

$$\alpha = \ln(2 - k_r). \quad (24)$$

С учетом (24) закон деформации тела рыбы или дельфина (22) можно представить иначе:

$$h(x, t) = h_{\text{хв}} \left[k_r - 1 + (2 - k_r) \left(\frac{x}{l} \right)^\gamma \right] \sin \left[\omega t - \frac{k_0 \ln(1 + bx)}{b} \right]. \quad (25)$$

Мы сформулировали закон деформации (22), в котором волновое число — функция координаты x , для избежания упомянутого выше физического противоречия. Проверим это. Подставив (22) в выражение для тяги в форме (6), получим

$$\{P\} = \frac{1}{4} \rho A(l) \omega^2 h_{\text{хв}}^2 \left[1 - \frac{U^2}{C_r^2 (1 + lb)^2} - \frac{U^2 \alpha^2 \gamma^2}{\omega^2 l^2} e^{2\alpha} \right]. \quad (26)$$

Это выражение должно обращаться в нуль при некотором соотношении между U и $C(x)$. Приравнять же U и $C(x)$ нельзя, так как $C(x)$ изменяется в пределах тела животного от C_r на кончике носа до $C_r(1 + lb)$ на кромке хвоста. Поэтому попытаемся выяснить, при каком соотношении между U и $C(x)$ выражение (26) обращается в нуль. Приравнивая нулю значение в квадратных скобках

$$1 - \frac{U^2}{C_r^2 (1 + bl)^2} - \frac{U^2 \alpha^2 \gamma^2}{\omega^2 l^2} e^{2\alpha} = 0,$$

получаем

$$\frac{U}{C_r (1 + bl)} = \sqrt{1 - \frac{U^2 \alpha^2 \gamma^2}{\omega^2 l^2} e^{2\alpha}}. \quad (27)$$

Видно, что существует вполне определенное соотношение между U и $C_r(1 + bl)$, при котором тяга обращается в нуль, причем при $U \neq 0$ и $\gamma \neq 0$ всегда $U < C_r(1 + bl)$.

Таким образом, предположение о зависимости фазовой скорости локомоторной волны от координаты в форме (17) действительно позволяет избежать упомянутого выше противоречия.

Значения параметров b , γ и k_r , входящих в закон деформации тела животного (22), могут быть установлены только в эксперименте. В настоящее время уже осуществлены эксперименты [2], которые подтвердили высказанное предположение о зависимости фазовой скорости локомоторной волны от координаты. Для параметра b получено значение $0,23 \pm 0,02 \text{ м}^{-1}$ при постоянной скорости плавания дельфина афалины, равной $4,3 \pm 0,07 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$. При этом получены значения и других параметров, входящих в закон деформации (22): $k_r = 0,22 \pm 0,02$; $\gamma = 4,07 \pm 0,25$.

1. Логвинович Г. В. Гидродинамика тонкого гибкого тела (оценка гидродинамики рыб).— Бионика, 1970, вып. 4, с. 5—12.
2. Романенко Е. В. Экспериментальное исследование кинематики дельфинов.— Докл. АН СССР, 1980, 253, № 3, с. 741—746.
3. Романенко Е. В. Некоторые вопросы теории плавания рыб и дельфинов.— Там же, с. 1082—1086.
4. Семенов Н. П., Бабенко В. В., Каян В. П. Экспериментальное исследование некоторых особенностей гидродинамики плавания дельфинов.— Бионика, 1974, вып. 8, с. 23—29.
5. Kelly H. R. Fish propulsion hydrodynamics. Developments in mechanics.— J. Proc. Sev. Midwest. Mech. Conf. Sept., 1961, N 6/8, p. 442—449.
6. Lighthill J. M. Note on the swimming of slender fish.— J. Fluid Mech., 1960, 9, N 2, p. 305—321.
7. Siekmann J. Theoretical studies of sea animal locomotion. Part 1.— Ing. Arch., 1962, 32, N 3, p. 214—221.
8. Uldrick J. P., Siekmann J. On the swimming of a flexible plate of arbitrary finite thickness.— J. Fluid Mech., 1964, 20, pt 1, p. 1—19.
9. Wu T. Y. Hydromechanics of swimming propulsion. Part 3. Swimming and optimum movements of slender fish with side fins.— J. Fluid Mech., 1971, 46, N 3, p. 545—553.