

БИОФИЗИКА

В. В. ШУЛЕЙКИН, член-корреспондент Академии Наук СССР,
В. С. ЛУКЬЯНОВА и И. И. СТАСЬ

СРАВНИТЕЛЬНАЯ ДИНАМИКА МОРСКИХ ЖИВОТНЫХ

В одной из предыдущих работ⁽¹⁾ авторами были исследованы гидродинамические качества некоторых рыб и дельфина в не слишком широких пределах изменения рейнольдсова числа. Там же было высказано предположение о том, что повидимому удельную мощность морских животных (максимальную мощность, отнесенную к одному грамму массы тела) можно считать постоянной. Исходя же из такого предположения, пришлось допустить, что максимальная скорость, доступная рыбе, должна возрастать пропорционально корню некоторой степени (близкой к третьей) из линейных размеров тела.

Это допущение было обосновано при условии, что рейнольдсово число меняется в довольно скромных пределах.

В настоящей работе границы исследований расширены до такой степени, что оказалось возможным объединить элементы динамики рыб (взрослых и мальков) с элементами динамики китов и с элементами динамики веслоногих планктонных рачков.

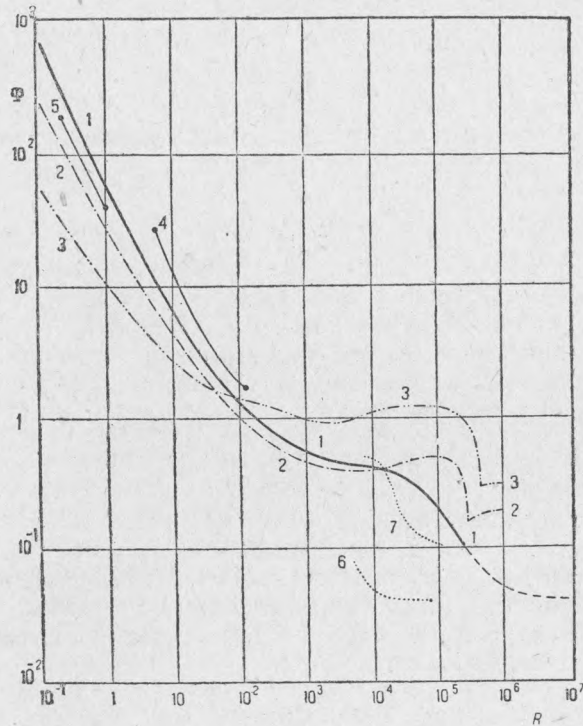
Прежде всего было произведено исследование изменений безразмерного коэффициента сопротивления: $\psi = \frac{2f}{\delta \cdot S \cdot v^2}$ при изменении рейнольдсова числа $R = \frac{d \cdot v}{\nu}$ в очень широких пределах.

Как известно, в приведенных формулах через f обозначается сила, сопротивляющаяся движению твердого тела в жидкости плотности δ со скоростью v . Через S обозначена наибольшая площадь поперечного сечения, через d — линейный поперечный размер тела в этом сечении, а через ν — кинематическая вязкость жидкости.

В отличие от цитированной работы⁽¹⁾ рыбы были выбраны теперь лишь из числа тех, которые обладают наиболее обтекаемой формой. Измерения, соответствовавшие особо большим рейнольдсовым числам (свыше 10^5), проводились над специально построенной моделью рыбы, деревянной, позволявшей удобно менять свинцовые грузы, несколько не меняя наружных очертаний тела. При самых малых значениях рейнольдсова числа, имеющих теоретический и практический интерес (порядка 10^{-1}), объектами служили металлические модельки (алюминиевая, латунная и свинцовая), падавшие в касторовом масле. Для лучшего контроля над точностью выполнения эти модельки были изготовлены с совершенно круглым поперечным сечением (а не с эллиптическим, характерным для большинства рыб). Поэтому на основе отрезка кривой, полученного для моделек (обозначенного номером 5 на диаграмме)

рамме, фиг. 1), пришлось строить соответствующий отрезок искомой характеристической кривой путем графической экстраполяции.

Сама искомая характеристическая кривая, полученная на основе непосредственных измерений над рыбами, измерений над большой моделью и упомянутой экстраполяции, нанесена на фиг. 1 под номером 1 (сплошная кривая). Для сравнения на фиг. 1 представлены еще четыре характеристические кривые, соответствующие движению шара (2), круглого цилиндра (3), для которого сила сопротивления отнесена к длине, равной диаметру, цилиндра с сечением обтекаемой формы применительно к той же длине (7) и идеально обтекаемого тела, длина кото-



Фиг. 1.

рого втрое превышает диаметр наибольшего сечения, (6). Эти четыре кривые заимствованы из физического справочника (2), где они были воспроизведены по данным целого ряда экспериментаторов.

Как видим, преимущество «обтекаемой» формы тела рыбы перед шарообразной начинает сказываться только после значения реинольдсова числа около 10^4 . Не потому-ли тихоходные рыбы, медленно перемещающиеся между водорослями, приобрели в процессе эволюции форму, именно ближе напоминающую шар?

Над кривой 1, соответствующей рыбам и китам рыбообразной формы, на фиг. 1 видна еще кривая 4, характеризующая коэффициент сопротивления веслоногих рачков (*Paracalanus*, *Centropages*). Эта кривая получена на основании опытов, которые будут описаны в специальной статье (второго автора настоящей работы). Опыты были проведены над моделями тел, исполненными в сильно увеличенном масштабе, а потому для осуществления закона подобия реинольдсово число доводилось до нормы путем замены морской воды весьма вязким концентрированным раствором сахара.

После того, как были получены характеристические кривые для рыбообразных тел (1) и планктонных рачков (2), оказалось возможным проследить за сравнительной динамикой морских животных значительно шире, чем рисовалось в начале наших исследований.

Легко видеть, что мощность, потребная для преодоления силы f сопротивления воды, выразится так:

$$W_v = \frac{1}{2} \psi \cdot \delta \cdot S v^3. \quad (1)$$

Допустим, что коэффициент полезного действия движителя рыбы равен η и что масса M ее тела выражена через площадь S наибольшего поперечного сечения, через длину L тела и некоторую осредненную плотность тела δ , практически чрезвычайно близкую к плотности воды:

$$M = \beta_1 \cdot \delta S L. \quad (2)$$

Тогда мощность, затрачиваемая мышцами на преодоление внешних сил, отнесенная к одному грамму массы тела, будет:

$$w_v = \frac{\psi}{2} \frac{v^3}{\beta_1 \cdot \eta \cdot L}. \quad (3)$$

Помимо нее некоторая энергия должна затрачиваться на преодоление внутреннего трения в самом мышечном веществе. Если через σ мы обозначим относительную деформацию мышцы, т. е. изменение длины одного погонного сантиметра мышечного волокна, то работа трения внутри грамма мышц при элементарной деформации $d\sigma$ будет, вообще говоря, выражаться так:

$$dP = \frac{\mu_m}{\delta_m} \cdot \frac{\partial \sigma}{\partial t} \cdot d\sigma. \quad (4)$$

Тут через μ_m обозначен коэффициент трения мышцы, через δ_m — ее плотность. Но ведь закон колебаний σ во времени был найден для рыбы первым автором настоящей работы (3). Применяв его в данном случае и выполнив некоторые простые преобразования, получим следующее выражение для мощности, поглощаемой вязкостью мышц, отнесенной к 1 г массы тела:

$$w_r = \frac{2\pi^2}{T^2} \cdot \nu_p \cdot k^2. \quad (5)$$

Здесь через T обозначен период поперечных колебаний тела, через ν_p — величина, имеющая характер кинематической вязкости мышц, а через k выражение:

$$k_0 = \frac{\overline{A \cdot b}}{\lambda^2} (4\pi^2 + \Delta^2),$$

в котором в свою очередь $\overline{A \cdot b}$ обозначает осредненное произведение амплитуды поперечных колебаний тела на расстояние мышечного волокна от оси позвоночного хребта. Через λ обозначена длина «твердой волны», пробегающей по телу рыбы во время движения, через Δ — логарифмический инкремент, характеризующий нарастание амплитуд поперечных колебаний при перемещении от головы к хвосту. В той же цитированной работе (3) указывалось, что отношение пути vT , пройденного рыбой за один период колебаний T , к длине L тела является некоторой характерной величиной, которую можно назвать «приведенным шагом». Обозначим его для краткости так:

$$\frac{vT}{L} = \beta_3. \quad (6)$$

Тогда на основании (5) и (6) можно будет записать:

$$\omega_p = \frac{2\pi^2}{\beta_3^2} \cdot k^2 \cdot \nu_p \cdot \frac{\nu^2}{L^2}. \quad (7)$$

Полная мощность, затрачиваемая рыбой на преодоление внешних и внутренних сопротивлений, отнесенная к 1 г массы, выразится на основании (3) и (7) так:

$$\omega = \frac{\psi}{2} \frac{\nu^3}{\beta_1 \cdot \eta \cdot L} + \frac{2\pi^2}{\beta_3^2} k^2 \cdot \nu_p \cdot \frac{\nu^2}{L^2}. \quad (8)$$

Назовем ее удельной мощностью животного.

Из (8) можно вывести выражение скорости ν движения рыбы через длину L ее тела:

$$\nu = \frac{nL^{\frac{1}{3}}}{\left(\psi + \frac{x}{R}\right)^{\frac{1}{3}}}. \quad (9)$$

Здесь сокращенно обозначено:

$$n = (2\beta_1 \cdot \eta \cdot \omega)^{\frac{1}{3}}, \quad (10)$$

$$x = 4\pi^2 \cdot \frac{\beta_1 \cdot \beta_2}{\beta_3^2} \cdot k^2 \cdot \frac{\nu_p}{\nu}. \quad (11)$$

В свою очередь ν обозначает кинематическую вязкость воды, а R , как и прежде, — рейнольдсово число; $\beta_2 = \frac{d}{L}$, где d — наибольший поперечный размер тела.

Формулы (9), (10), (11) приобретут особо важное значение в том случае, если мы условимся подразумевать под ω максимальную удельную мощность, доступную животному. Тогда очевидно формула (9) выразит максимальную скорость, которая доступна животному той или иной заданной длины L .

Исходя из физико-химических соображений, можно ожидать, что максимальная удельная мощность весьма мало меняется в пределах от малька рыбы до гигантского кита. Отметим также, что и все остальные величины, входящие в (10) и (11), меняются по видимому в довольно узких пределах при изменении размеров тела. Поэтому значения корней кубических из них должны меняться совсем уж незначительно. В настоящее время за отсутствием детальных исследований будем пока считать n и x постоянными и распространим формулу (9) на быстрходных китов, движение которых заведомо также происходит благодаря распространению «твердых волн» вдоль их тела.

Попробуем убедиться в законности подобных допущений, сопоставив результаты непосредственных измерений (для различных морских животных) с теоретической формулой (9). Так как формула эта содержит две константы, то соответствующая кривая определяется двумя заданными точками. Однако само по себе соотношение (9) неудобно для построения. Поэтому получим из него два уравнения, которые позволят очень просто выразить связь между ν и L в параметрической форме.

Исключим из (9) L , выразив эту величину через R и ν :

$$L = \frac{\nu \cdot R}{\beta \cdot \nu}. \quad (12)$$

Тогда вместо (9) получим после преобразований:

$$\nu = U \left(\frac{R}{\psi + \frac{x}{R}} \right)^{\frac{1}{4}}, \quad (13)$$

причем:

$$\frac{\beta U^4}{\nu} = n^3. \quad (14)$$

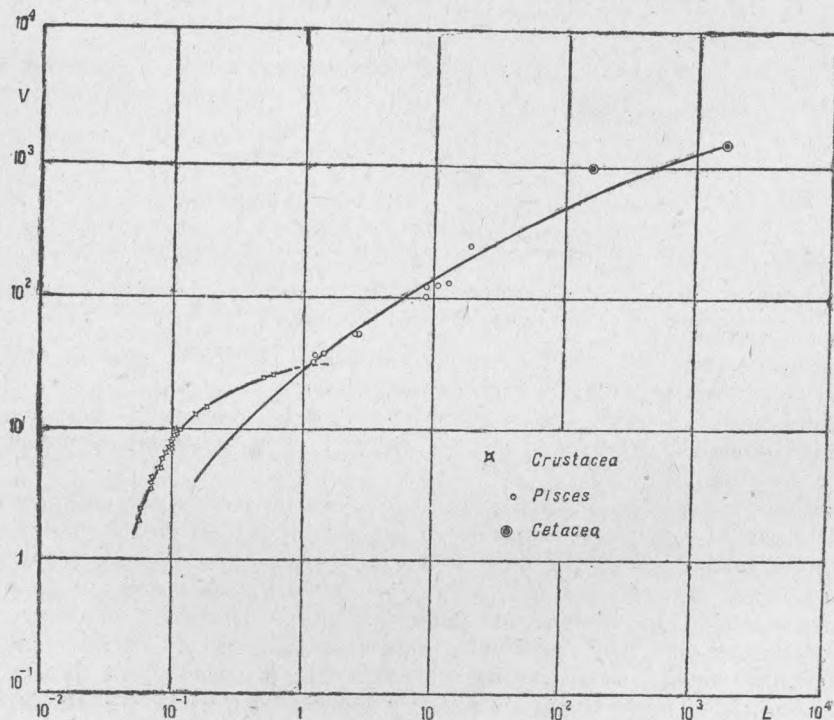
Константы U и κ определим, задавшись числами, характеризующими движение мальков кефали, с одной стороны, и 17-метрового кита сейвала (*Balaenoptera borealis*), — с другой.

Для первого объекта измерения, сделанные на Черноморской гидрофизической станции, дали:

$$L = 1.4 \text{ см}, \quad \nu = 40 \text{ см/сек.}, \quad R = 1.1 \cdot 10^3.$$

Для последнего на основании литературных данных:

$$L = 1700 \text{ см}, \quad \nu = 1500 \text{ см/сек.}, \quad R = 4.5 \cdot 10^7.$$



Фиг. 2.

Вычислив константы U и κ и пользуясь диаграммой фиг. 1 (кривой 1), легко определить по (13) максимальные скорости ν , соответствующие различным значениям параметра R . Вслед за тем по формуле (12) определяются и значения L , соответствующие этим максимальным скоростям.

Теоретическая кривая, построенная таким способом (по двум эмпирическим точкам), нанесена на диаграмму фиг. 2, где верхним пределом служит точка, соответствующая сейвалу. В направлении малых длин L кривая экстраполирована до значений L , соответствующих наименьшим размерам мальков, существующих в природе.

Как видим, кривая вполне удовлетворительно укладывается среди точек, полученных путем непосредственных измерений третьим автором настоящей работы (над рыбами, плававшими в большом лотке). Только одна точка, соответствующая дельфину [скорость по Грею⁽⁴⁾], легла значительно выше кривой, что объясняется некоторыми исключительными

качествами энергетики дельфина. Основную гипотезу о постоянстве w можно следовательно считать подтвержденной.

На диаграмме фиг. 2 представлена еще вторая (более короткая) кривая, которая проходит по точкам, полученным на основании непосредственных наблюдений над планктонными рачками *Paracalanus* и *Centropages* (преобладающее число мелких кружочков на диаграмме) и над несколькими рачками семейства *Gammaridae* (четыре точки в правой части короткой кривой).

Как видим, ниже некоторого предельного значения L рыбы начинают уступать веслоногим рачкам в максимальных скоростях движения. Вот почему в процессе эволюции рыбы вступили на сцену лишь на определенном этапе увеличения длины. Ниже этого этапа лежит область, завоеванная веслоногими. Еще ниже повидимому самым рациональным двигателем окажутся реснички.

Черноморская гидрофизическая станция.
Симеиз. Кацивели.

Поступило
19 I 1939.

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

¹ В. В. Шулейкин, В. С. Лукьянова и И. И. Стась, ИМЕН, сер. геогр. и геоф., стр. 582 (1937). ² Н. Geiger u. K. Scheel, Handbuch der Physik, VII, 168—169. ³ В. В. Шулейкин, ИМЕН, стр. 574 (1934). ⁴ J. Gray, Journ. Experiment. Biology, XIII, 192 (1936).