

В. С. ЛУКЬЯНОВА

О МАКСИМАЛЬНЫХ СКОРОСТЯХ МОРСКИХ ПЛАНКТЕРОВ

(Представлено академиком П. П. Лазаревым 19 IV 1940)

В одной из предыдущих работ ⁽¹⁾ мною была исследована связь между некоторыми внешними факторами и скоростями, с которыми движутся пресноводные планктеры. В то же время наметилась резко выраженная зависимость между максимальной скоростью движения планктонного организма и размерами его тела.

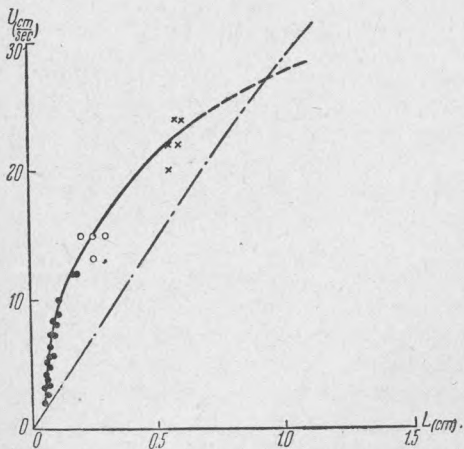
В настоящей статье изложены результаты опытов, проделанных над морскими планктерами, опытов, позволивших установить совершенно определенную связь между размерами тела и той максимальной скоростью, которую данный планктер способен развивать.

Методика измерений, разработанная мною уже раньше ⁽²⁾, заключалась в следующем. Опытное животное помещалось в стеклянную кюветку, монтированную на стеклянном диске (размер кюветки менялся в зависимости от размеров исследуемых форм). Путь, проходимый животным, определялся по подклеенной ленте из миллиметровой бумаги, а время, потребное на прохождение этого пути, — по секундомеру.

Так как температура и соленость влияют на скорости движения,

то пришлось позаботиться о поддержании достаточного постоянства этих факторов: соленость была практически постоянной; температура менялась в пределах не более чем от 22 до 24°.

На фигуре точками обозначены результаты измерений над скоростями *Centropages kröyeri* и *Paracalanus parvus*, а кружками — результаты подобных же измерений скоростей, проделанных над *Anomalocera*. По оси абсцисс отложены размеры тела животных, считая от конца головы до фурки (в см). По оси ординат — максимальные их скорости (в см в секунду). На той же диаграмме крестиками обозначены результаты опытов, проделанных мною над крупными организмами *Gammaridae*. Кривая из точек и черточек, нанесенная для сравнения на фиг. 1, соответствует «рыбообразному» движителю. Она взята из работы ⁽³⁾.



Очень интересно было применить к исследованию движения всех этих животных те теоретические соображения, которые были высказаны В. В. Шулейкиным относительно сравнительной динамики морских животных⁽³⁾.

В отличие от наземных животных, для которых по Хиллу⁽⁴⁾ максимальная скорость должна оставаться постоянной, морские животные, по Шулейкину должны были бы двигаться в воде со скоростями, пропорциональными корню кубическому из их линейных размеров, если бы коэффициент сопротивления формы оставался у них неизменным при изменениях рейнольдсова числа (т. е. произведения скорости на размер, деленного на кинематическую вязкость воды). В действительности по упомянутой теории⁽³⁾ максимальная скорость рыб, дельфинов и больших зубатых китов выражается формулой:

$$V = \frac{nL^{1/3}}{\left(\psi + \frac{\alpha}{R}\right)^{1/3}}, \quad (1)$$

в которой L обозначает длину тела, R —рейнольдсово число, ψ —так называемый безразмерный коэффициент сопротивления, α —коэффициент, зависящий от вязкости воды, вязкости мышц и от геометрических соотношений тела, n —коэффициент, связанный с той максимальной мощностью, которую может развить один грамм мышечного вещества.

В свою очередь ψ выражается так:

$$\psi = \frac{2f}{\delta \cdot S \cdot v}. \quad (2)$$

Здесь через f обозначена сила, сопротивляющаяся поступательному движению тела, δ —плотность воды, S —максимальная площадь поперечного сечения тела, v —скорость движения.

Нет никакого сомнения в том, что константы n и α , вычисленные Шулейкиным, на основе опытов Стася над крупными рыбами и моих опытов над мальками, а также на основе наблюдений над китообразными совсем непригодны для описания движения веслоногих, движитель которых работает совсем иначе.

Построить такую же теорию работы движителя веслоногих едва ли кому-нибудь удастся ввиду очень большой сложности механизма работы их «весел» и еще большей сложности работы мышечного аппарата. Следовательно, за неимением лучшего интересно было посмотреть: нельзя ли охватить результаты наших опытов с планктерами аналогичной формулой, формулой (1), в которой коэффициенты n и α должны быть заменены (их можно вычислить по опытному материалу). Для того чтобы сделать такую попытку, необходимо было прежде всего определить коэффициент ψ для планктеров и его зависимость от рейнольдсова числа. Сами по себе рейнольдсовы числа здесь, понятно, весьма малы благодаря малости линейных размеров тела и малости скоростей. Определять ψ непосредственно путем измерений над телами самих планктеров чрезвычайно трудно, если только вообще возможно. Поэтому мы определяли связь между ψ и R на моделях *Centropages* и *Paracalanus*, используя известный закон подобия, согласно которому ψ зависит только от R , но не зависит от L , v и ν в отдельности. Модели были приготовлены из стекла в схематизированном виде, но с соблюдением основных пропорций. Линейные размеры превышали натуру в десятки раз. Стало быть, надо было позаботиться о соответствующем уменьшении скорости движения и увеличении кинематической вязкости среды (входящей в знаменатель выражения

для R). Поэтому падение моделей осуществлялось в касторовом масле, а сами модели загружались дробинками так слабо, чтобы они падали с самыми малыми возможными скоростями.

Так как вязкость касторового масла сильно меняется с изменением температуры, то измерения вязкости его производились непосредственно перед опытами и после них. Само измерение вязкости производилось хорошо известным методом наблюдения за скоростью падения шариков (костяных).

Для наиболее точного определения движущей силы f применялась установка, аналогичная обыкновенным гидростатическим весам. Модель подвешивалась на очень тонкой шелковинке к одному из плеч коромысла весов так, что она полностью погружалась в касторовое масло. После определения движущей силы, которую можно было изменять, загружая модель тем или иным количеством мелких дробинок, шелковинка пережигалась, благодаря чему модель приходила в движение без начального толчка, без начальной скорости. При таких малых движущих силах это имело очень большое значение.

Скорость падения моделей измерялась путем засечки на секундомере того промежутка времени, который бывал необходим для прохождения модели от одного визира до другого. Так как скорости всегда были малы, то не составляло труда поспеть перевести глаз от одного визира к другому.

Во время опытов рейнольдсовы числа менялись в пределах от 5,7 до 120, причем значения ψ , как оказалось, менялись в пределах от 27,5 до 1,7. Различия между характеристиками *Centropages* и *Paracalanus* оказались ничтожно малым.

Воспользовавшись результатами опытов, я попыталась по ним найти параметры n и z , при которых максимальные скорости планктеров можно было бы описать формулой Шулейкина (1). Однако оказалось, что для планктеров веслоногих подобный выбор параметров невозможен: схема движения их так далека от схемы «твердой волны», свойственной рыбам и зубастым китам, что никаких даже отдаленных аналогий здесь провести невозможно.

Тем не менее, чрезвычайно важно проследить: при каких размерах тела наиболее выгодным для животного является движитель типа рыбы и при каких — движитель типа веслоногих. Наши опыты позволяют это сделать весьма просто. В цитированной совместной работе (3) было уже показано, что при длине тела меньше 1 см рыбы начинают уже уступать веслоногим в отношении максимальных скоростей. Однако, если присмотреться к ходу кривой на фигуре, станет очевидным, что при дальнейшем уменьшении длины тела преимущество веслоногих утрачивается: более выгодным снова оказывается движитель типа рыбы. На фигуре видно, что веслоногие начинают терять преимущество при размерах тела короче нескольких сотых долей сантиметра. По всей вероятности, именно здесь лежит причина того, что в природе встречаются веслоногие, длина тела которых не выходит за пределы от нескольких сотых сантиметра до сантиметров: именно этот диапазон отвоевали веслоногие в процессе естественного отбора, в процессе борьбы за существование.

В последнее время Шулейкин показал теоретически, что при очень малых размерах тела формула (1) переходит в такую:

$$U = n^{3/2} \left(\frac{\beta_2}{z + 24} \right)^{1/2} \cdot L. \quad (3)$$

Другими словами, здесь максимальная скорость начинает убывать по линейному закону. Можно предполагать, что «рыбообразный» движитель теоретически сохраняет свои высокие качества при предельно малых

размерах тела, вплоть до единственной клетки. И действительно, в природе снова встречается этот тип движителя у одноклеточных, а также у сперматозоидов млекопитающих животных.

Представим себе «рыбку» таких же ничтожных размеров, как сперматозоид, и вычислим по (3) ее возможную максимальную скорость. Придется принять, что длина тела: $L \approx 3 \cdot 10^{-3}$ см; площадь наибольшего поперечного сечения: $3 \cdot 10^{-8}$ см²; площадь поперечного сечения хвоста: 10^{-10} см². Приняв все это во внимание, получим теоретическую максимальную скорость:

$$v = 1,5 \cdot 10^{-2} \text{ см/сек.}$$

В действительности наблюдались скорости движения (6) сперматозоидов примерно до $v = 0,7 \cdot 10^{-2}$ см/сек., т. е. порядка, близкого к теоретическому.

Итак, мы можем заключить отсюда, что, во-первых, гипотеза Шулейкина о постоянстве «удельной мощности» подтверждается в пределах от гигантского кита до одноклеточного жгутикового и, во-вторых, что «рыбообразный» движитель оказывается наиболее совершенным не только в пределах от 1700 см до 1 см, но и на самых низких диапазонах размеров тела: только на некоторых промежуточных этапах он заменяется «веслами» или ресничками.

Черноморская гидрофизическая станция
Академии Наук СССР
Симеиз. Кацивели

Поступило
19 IV 1940

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

¹ В. С. Лукьянова, Зоол. журнал, XVII, вып. 2 (1938). ² В. С. Лукьянова, ДАН, XIX, № 6—7 (1938). ³ В. В. Шулейкин, В. С. Лукьянова и И. И. Стась, ДАН, XXII, № 7 (1939). ⁴ A. Hill, Muscular Movement in Man, 41 (1927). ⁵ Handb. norm. und pathol. Physiol., VIII/4. 39 (1925).