ГИДРОДИНАМИКА ЖИВОТНЫХ

ЧЕМПИОНЫ ПОДВОДНОГО ПЛАВАНИЯ

О скоростях, достигаемых морскими животными, ходят целые легенды. Конечно, многое в этих легендах – преувеличение. Но все-таки они основаны на фактах, заставивших ученых провести строгие измерения.

Крупный тунец, проглотив живца, начинает разматывать леску спиннинга. Лучшей возможности для измерения скорости этой рыбы трудно придумать. Измерения показывают, что в течение нескольких секунд он движется со скоростью 90 км/ч. А меч-рыбы питаются тунцами. В литературе за меч-рыбой утвердилась скорость 130 км/ч. Такая скорость не достижима ни для одного подводного судна.

Вызывают восхищение ловкие и быстрые дельфины, которые, хотя и не развивают таких больших скоростей, однако дают хороший пример экономичного использования энергетических ресурсов, заключенных в их мышцах.

Говоря о дельфинах, уместно вспомнить парадокс, который лет тридцать назад сформулировал английский физиолог Грей. Определив энергетические возможности дельфина и сопоставив их с необходимой для его движения мощностью, он пришел к выводу, что требующаяся мощность раз в семь превосходит возможную. Из этого противоречия Грей сделал закономерное предположение, что дельфин обладает эффективным механизмом, который уменьшает гидродинамическое сопротивление по сравнению с контрольной твердой моделью в семь раз.

Правда, в последнее время начали подвергать сомнению точность вычислений Грея и вместо семи называют цифру четыре, и к этому добавляют, что при кратковременной работе дельфин может развить мощность, в четыре раза превосходящую нормальный уровень. Эти сомнения и вызвали вопрос: существует ли парадокс Грея?

Приведем один простой пример, который позволит нам занять по этому вопросу совершенно определенную позицию. Для этого вычислим сопротивление дирижаблевидного тела диаметром 0,5 м и длиной 2,25 м, движущегося со скоростью 25 м/с. Согласно многочисленным экспериментальным данным сопротивление такого тела равняется 3000 Н. Чтобы двигать его со скоростью 25 м/с при стопроцентном коэффициенте полезного действия, требуется 100 л. с. Рассмотренное дирижаблевидное тело можно сравнить с тунцом, который имеет такие же размеры и может двигаться, как мы знаем, с такой же скоростью. Это сравнение наводит на мысль, что тунец должен либо превосходить по своей мощности табун в 100 лошадей, либо иметь весьма эффективный способ снижения гидродинамического сопротивления. Не нужно быть специалистом, чтобы понять, что холоднокровная рыба, использующая для окислительных процессов кислород, растворенный в воде в весьма малой концентрации, не может соперничать в мощности с табуном теплокровных животных. Кроме того, на хвостовой плавник тунца, обеспечивающий его движение, работает только одна треть всех мышц. Остальные мышцы не связаны с хвостовым плавником и в создании тяги не могут участвовать.

Если бы водные обитатели испытывали такое сопротивление, как построенные человеком суда, то они не могли бы осуществить дальние миграции по морям и океанам.

Следовательно, природа допускает такое движение в воде, которое сопровождается малым

сопротивлением.

В чем же секрет быстрого и экономичного плавании водных животных? Чтобы разобраться в этом процессе, познакомимся с некоторыми сторонами гидродинамики водных животных.

ПРИРОДНЫЕ ДВИЖИТЕЛИ

Для того чтобы какое-либо тело могло двигаться в воде, необходимо наличие силы, уравновешивающей гидродинамическое сопротивление. Как известно, в созданных человеком конструкциях такую силу создают гребные винты-движители, которые отбрасывают сильную струю воды. А как создают силу тяги рыбы, дельфины и другие обитатели водной среды?

При простейшей классификации движителей, используемых водными животными, мы должны указать три их типа: гидрореактивный, гибкую пластинку, машущее крыло.

Гидрореактивный движитель животных работает так же, как и водометный движитель, созданный человеком. Мощный мускульный мешок кальмара выталкивает воду через узкое отверстие воронки и тем создает тягу. Поворотом воронки осуществляется изменение направления движения. Способность кальмара изменять объем обусловливает некоторую специфику его движения. При уменьшении массы кальмара происходит дополнительное увеличение скорости движения. Правда, при следующем цикле, когда мускульный мешок будет набирать воду, произойдет такое же торможение. Однако в том случае, если кальмар удирает от хищника, такое неравномерное движение в сочетании с высокой маневренностью может дать ему определенные преимущества.

Более распространенным является второй тип движителя, который мы назвали гибкой пластинкой. Чисто периодическое колебание пластинки приводит к появлению как силы тяги, так и силы торможения. Чтобы гибкая пластинка создавала тягу, она должна изгибаться по закону бегущей волны. При этом амплитуда волны должна возрастать от носа к хвосту. Нестационарность движения точек пластинки приведет к появлению реакции инерционных сил со стороны жидкости. Эти силы на заднем склоне каждой волны создают силу тяги, а на переднем – силу торможения. Благодаря нарастанию амплитуды эти силы оказываются разными, отчего суммарная сила будет отлична от нуля.

Положителъный вклад сил оказывается еще больше, если пластинка будет двигаться с ускорением; тогда в каждый последующий момент времени она будет находиться в потоке с большей скоростью, чем в предыдущий. Так как в создании тяги участвует вся поверхность, то такой движитель способен вызвать большое ускорение, хотя КПД его будет не очень высок. Описанный механизм создания тяги целесообразен в тех случаях, когда нужно сделать рывок, например, для преодоления водопада, при погоне за добычей. Угорь, форель дают прекрасный пример такого движителя. Более подробно рассмотрим третий тип движителя.

МАШУЩЕЕ КРЫЛО

Наиболее высоким КПД обладает движитель типа «машущее крыло». Такое название объясняется сходством действия плавника с работой крыльев птиц. Да и по своей форме хвостовой плавник тунца очень напоминает форму крыльев таких птиц, как ласточка или стриж.

К указанному типу движителей относятся хвостовые плавники морских млекопитающих и чемпионов подводного плавания – тунца и меч-рыбы. В отличие от рыб, у млекопитающих хвостовой плавник расположен в горизонтальной плоскости и колеблется в вертикальном направлении, почти как крылья у птиц.

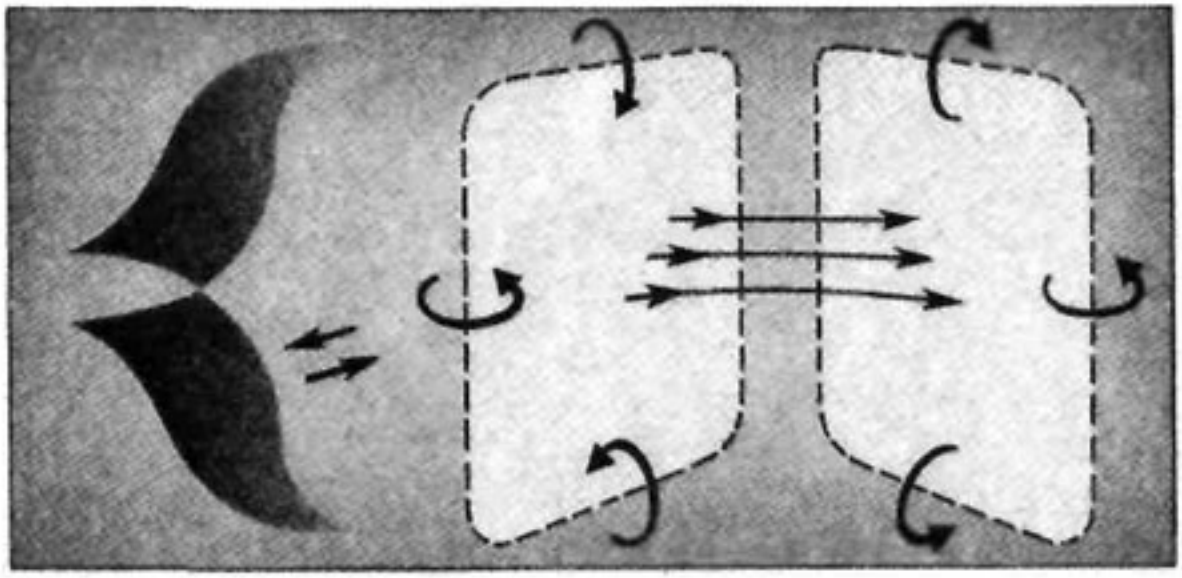

Рис. 49

Такие движения млекопитающих, дышащих воздухом, обеспечивают им хорошую маневренность в вертикальной плоскости. Однако вдали от свободной поверхности, где горизонтальные и вертикальные направления не отличаются друг от друга, работа движителя рыб и млекопитающих не имеет различия.

Каков механизм создания тяги у такого движителя? При поперечном колебании хвостовой плавник как бы закручивает воду, создавая вокруг себя вихревой жгут. Концы этого вихревого жгута сносятся потоком вниз. Смыкаясь, жгут образует кольцо, одним из участков которого является сам плавник. В крайних верхнем и нижнем положениях хвостовой плавник для смены направления делает резкое движение, благодаря которому вихревой жгут срывается с плавника. От плавника отрывается замкнутое вихревое кольцо и начинает формироваться новое. На рис. 49 показана схема создаваемых хвостовым плавником вихрей. Внутри вихревого кольца скорость воды больше, чем снаружи: Это создает струю воды, направленную вниз по потоку. Очевидно, что, так же как и у гребных винтов, создание такой струи приводит к появлению силы тяги, приложенной к хвостовому плавнику.

Какими достоинствами обладает такой механизм создания силы тяги? Исследования движителя типа «машущее крыло» проводили на специальном испытательном стенде, в гидродинамическом лотке. Именно там была обнаружена вихревая картина, которую мы описали. На стенде, кроме того, имелась возможность измерять мгновенное значение силы тяги и потребляемую мощность. Эти измерения показали большую эффективность такого типа движителя. В частности, сила тяги в швартовом режиме, т. е. при испытании в неподвижной жидкости, оказалась почти в четыре раза больше, чем у обычного движителя с той же ометаемой площадью и с той же частотой вращении. Расход мощности на единицу силы тяги при этом также оказался несколько меньше. Именно этим объясняется способность дельфина стоять, почти полностью высунувшись из воды.

Создаваемая таким движителем тяга зависит от ометаемой плавником площади. А так как поперечные размеры плавника превосходят поперечные размеры туловища, то и ометаемая площадь оказывается больше поперечного сечения туловища дельфина или тунца. У судов, созданных человеком, площадь, ометаемая гребными винтами, всегда намного меньше поперечного размера судна. Чтобы создать с помощью узкой струи заметную тягу, приходится отбрасывать воду с большой скоростью. Кинетическая энергия такой струи – это и есть потерянная энергии. У рыб и дельфинов

струя, образованная вихрем, очень широкая, и необходимая тяга образуется уже при малой скорости в этой струе. Мала и потерянная мощность. Эти достоинства позволяют морским животным развивать большие скорости. Тело у них веретенообразное и малоподвижное. Мощная мускулатура заставляет колебаться довольно жесткий хвостовой плавник с большой частотой.

Заметим, что возможно и комбинированное использование двух типов движителей.

В минуту опасности работает весь плоский корпус, обеспечивая большую тяговую силу.

В спокойном состоянии работает только хвостовой плавник как наиболее экономичный движитель.

У читателей, увлекающихся подводным спортом, может возникнуть вопрос, как усовершенствовать ножные ласты для человека. Выпускаемые в настоящее время ласты являются комбинацией гибкой пластинки и машущего крыла. Причем достоинства обоих движителей используются слабо. Появившиеся в последнее время длинные моноласты несколько улучшили тягу за счет использовании гибкой пластинки.

Проведенные исследования показали, что ласты типа «машущее крыло» будут намного более эффективными. Однако устройство их более сложно. В то время как гибкую пластинку можно изготовить из пассивных упругих элементов подходящей жесткости, машущее крыло требует механизма принудительной перекладки в крайних верхнем и нижнем положениях.

СЕКРЕТЫ БОЛЬШОЙ СКОРОСТИ

Итак, мы убедились, что водные животные обладают различными, подчас совершенными, механизмами создания тяги. Однако это нисколько не отвечает на вопрос, который возникает в связи с парадоксом Грея. Ведь движитель служит лишь средством превращения мускульных усилий в тягу, необходимую для движения. Каким бы совершенным ни был этот движитель, он не может иметь КПД выше 100%. Чтобы быстро двигаться, нужно иметь либо большую мощность, либо малое сопротивление. Большую мощность рыба не может иметь по физиологическим причинам; значит, она должна обладать значительно меньшим сопротивлением, чем ее твердая модель, сопротивление которой нам известно.

Первое, в чем обычно ищут объяснение большим скоростям водных животных, – это их форма. Действительно, форма быстроходных рыб и млекопитающих всегда совершенна. Характерно, что хотя рыбы и млекопитающие сильно различаются по своему происхождению и физиологическим признакам, одинаковые условия плавания привели к большому сходству их внешних форм.

Опережая вопросы читателя, скажем, что судостроители в полной мере использовали опыт живой природы. Если подводные лодки времен второй мировой войны имели большую длину, отношение которой к диаметру достигало 11–13, то современные лодки имеют форму, близкую к форме тунца, с отношением длины к диаметру 5–6.

Однако хотя оптимальная форма и позволяет уменьшить расход мощности и увеличить скорости подводных лодок, экономичность и скорость плавания водных животных остались недостигнутыми. Ведь парадокс Грея, о котором шла речь выше, относится именно к этим оптимальным формам.

В чем же может быть секрет быстрого плавания? Напомним, что течение вязкой жидкости может быть двух типов: слоистым (ламинарным) и турбулентным, с бурным перемешиванием слоев. Легко

Рис. 50

понять, что во втором случае гидродинамическое сопротивление движению будет значительно больше. Каким путем можно предотвратить переход ламинарного течения в турбулентное? Один из эффективных путей –это введение полимерных добавок, изменяющих физические свойства жидкости. Действие полимерных добавок может быть двояким. С одной стороны, добавки могут уменьшить вязкость жидкости в пристеночном слое, а с другой – длинные молекулы полимеров способны воспрепятствовать мелкомасштабным возмущениям, которые характерны для турбулентного течения. Важным свойством полимерных добавок является то, что указанный эффект они вызывают при весьма низких концентрациях (10^{-3}–10^{-4}%). Добавка такого полимера в охлаждающую жидкость радиатора уменьшает сопротивление на 70%. Вращающийся в жидкости диск при наличии полимерных добавок испытывает на 60% меньшее сопротивление.

Все эти экспериментальные данные позволяют считать слизистое покрытие многих костистых рыб эффективным средством снижения гидродинамического сопротивления. Если к тому же принять во внимание, что молекулярный вес слизистых выделений значительно больше, чем у испытанных человеком синтетических полимеров, и способ подачи слизи в пристеночный слой более совершенен, чем в опытах, то можно предположить, что рыбы достигают большего эффекта с меньшим расходом вещества, чем это осуществлено в опытах.

Теоретический анализ влияния полимерных добавок показывает, что они способны увеличить допустимые размеры и скорости, при которых сохраняется ламинарное течение, только в ограниченных пределах. Следовательно, крупные и быстроплавающие рыбы и млекопитающие должны иметь другой механизм снижения сопротивления, не связанный со слизистыми выделениями на поверхности кожи.

Здесь уместно вспомнить об упруго-демпфирующем покрытии, изобретенном американским инженером Крамером, которое моделирует такое покрытие у дельфина. Не будем останавливаться на конструкции такого покрытия, а скажем только, что своими свойствами оно должно обеспечивать поглощение всех возмущений, развитие которых и приводит к разрушению ламинарного течения. Проведенные Крамером эксперименты показали, что его покрытие способно уменьшить сопротивление на 40%. Особенностью такого покрытия является то, что оно вызывает уменьшение сопротивления только в узком диапазоне скоростей. Вне этого диапазона это покрытие способно даже увеличить сопротивление. Не исключена возможность, что некоторые млекопитающие и рыбы пользуются именно таким способом снижения сопротивления. Кроме того, для расширения диапазона допустимых скоростей они могут регулировать упругие свойства своего покрытия. Однако и этот способ снижения сопротивления становится неэффективным с ростом размеров и скоростей. Поэтому даже у дельфина, скорость которого при длине тела два метра достигает 10–15 м/с, а тем более у тунца и меч-рыбы следует искать другой механизм снижения сопротивления.

Таким механизмом может быть бегущая по поверхности тела волна. Остановимся более подробно на том, какое именно течение формируется вдоль бегущей волны и благодаря чему она способна уменьшать сопротивление. На рис. 50 показано, как течет жидкость между гребнями волны. Передний фронт волны как бы выбрасывает жидкость в поток, а задний фронт откачивает эту жидкость. Таким

образом, бегущая волна заставляет двигаться вдоль тела некоторый слой жидкости. Именно это обстоятельство и приводит к уменьшению сопротивления. Однако чтобы такое течение реализовалось, нужно выполнить несколько специальных условий. Прежде всего, длина волны должна быть достаточно малой. Это необходимо по двум причинам. Во-первых, на всей длине тела должно укладываться по меньшей мере несколько десятков таких волн, так как в первых из них указанное течение только будет формироваться, и лишь последующие будут служить целям уменьшения сопротивления. Во-вторых, малый размер волны нужен еще и для устойчивости ламинарного течения между гребнями волн. При больших размерах волны это течение может разрушиться, превратившись в бурное турбулентное течение. Вот почему бегущая волна, предназначенная для снижения сопротивления, должна в корне отличаться от крупномасштабной волны, которая обеспечивает водному животному тягу. Мы подчеркнули этот факт потому, что в популярной литературе часто смешивают эти два типа волн.

Другое условие, которому должна удовлетворять бегущая волна, это согласование скорости движения тела и фазовой скорости волны, так как бегущая волна способна не только уменьшать, но и увеличивать сопротивление. Для проверки эффективности бегущей волны была изготовлена специальная модель, которая получила шутливое наименование «стиральная доска». Эксперименты показали, что если скорость движения волны меньше половины скорости движения модели, то сопротивление последней больше сопротивления гладкой поверхности. С дальнейшим ростом скорости волны сопротивление уменьшается, и при равенстве скоростей модели и волны оно становится в 3–4 раза меньше сопротивления гладкой поверхности.

Какое же устройство генерирует и поддерживает бегущую волну? Таким механизмом может быть гидро-упругий флаттер поверхности животного, т. е. автоколебания упругого тела в быстром потоке воды. Подобно тому, как ветер вызывает на поверхности моря бегущие волны, движущаяся вода может вызвать волны на коже дельфина или тунца. Напрягая или ослабляя подкожные мышцы, животное может регулировать упругие свойства своего покрытия и настраивать их в зависимости от скорости плавания. Заканчивая рассказ о влиянии бегущей волны, скажем, что с таким объяснением хорошо согласуется парадоксальный, на первый взгляд, факт наличия шероховатости на поверхности тела у таких быстроходных животных, как акулы, парусники, меч-рыбы. Шероховатость как бы увеличивает сцепление между телом и той частью воды, которая увлекается бегущей волной.

Читатель может спросить: если известен механизм снижения сопротивления, то почему же его не применяют до сих пор на судах? На это имеются свои причины.

Во-первых, бегущая волна способна не только уменьшать сопротивление, но и увеличивать его. И следует провести довольно сложные эксперименты, чтобы найти параметры волны, которая будет уменьшать сопротивление.

Вторая причина, в отличие от первой, имеет чисто конструктивный характер. Сделать корабль с такими стенками, упругие свойства которых могут меняться, довольно сложная задача. Однако для человека важно познать эффективность природных приспособлений, а затем он может либо повторить их, либо найти удобное для себя решение.

В.И. Меркулов, «Гидродинамика знакомая и незнакомая» – М.: Наука, стр.100–107, 1989