

О ФУНКЦИОНИРОВАНИИ КТЕНОИДНОГО АППАРАТА РЫБ В УСЛОВИЯХ ТУРБУЛЕНТНОГО ПОГРАНИЧНОГО СЛОЯ

В. Д. БУРДАК

Институт биологии южных морей Академии наук Украинской ССР (Севастополь)

Рассматривается гидродинамическая функция ктеноидов на чешуе рыб при различном состоянии пограничного слоя, в диапазоне чисел Рейнольдса от 10^4 до 10^7 . Показано, что ктеноидный аппарат способен выполнять функции ламинаризатора в условиях как ламинарного, так и турбулентного пограничного слоев, при различной степени развития турбулентности. Во всех случаях функции ктеноидного аппарата направлены на снижение гидродинамического сопротивления, встречаемого рыбой при движении.

Как уже было показано (Бурдак, 1968), имеющиеся на чешуе многих рыб шипики — ктеноиды выполняют функцию спрямляющей решетки, упорядочивающей течение в пограничном слое, т. е. способствуют его ламинаризации. В соответствии с этим ктеноидная чешуя встречается чаще всего в диапазоне чисел Рейнольдса Re от 10^4 до 10^6 , т. е. в том интервале, где уже возможно турбулентное состояние пограничного слоя, но где оно еще может быть предотвращено.

Проведенный автором анализ распределения ктеноидов на поверхности тела различных рыб свидетельствует о том, что ктеноиды находятся как на участках тела с ламинарным режимом обтекания, например, на конфузормом участке, так и на таких участках, где течение в пограничном слое явно турбулентное, например, на хвостовом стебле при $Re > 10^6$. Нахождение ктеноидов на участках с турбулентным режимом несколько не противоречит их ламинаризаторной функции, которая остается полезной и в условиях турбулентного режима течения в пограничном слое, что и рассматривается ниже.

Очевидно, что при движении любой рыбы величины Re меняются от весьма малых, отвечающих плаванию с очень низкой скоростью, до больших, соответствующих движению с максимальными доступными для данной рыбы скоростями. Отсюда и ктеноидный аппарат должен соответственно работать при различных значениях Re — как при очень малых, так и при максимально доступных для данной рыбы. А из этого, в свою очередь, следует, что ктеноидный аппарат должен сохранять свое значение в более или менее широком диапазоне чисел Рейнольдса, в условиях как ламинарного, так и турбулентного режимов течения в пограничном слое.

Если рассматривать совокупность ктеноидов как спрямляющую решетку или сеточный фильтр, употребляемые в аэро- и гидромеханике для уменьшения степени турбулентности потока путем размельчения вихрей, то станет очевидным, что ктеноидный аппарат может целесообразно работать в очень широком диапазоне чисел Рейнольдса. В пределах этого диапазона, примерно от $Re = 10^4$ до $Re = 10^7$, ктеноидный аппарат сохраняет свое значение у рыб весьма различной длины, приспособленных к движению с разными скоростями, а также у любой данной рыбы на любых участках тела, при любых скоростях плавания.

При малых числах Рейнольдса, когда угроза турбулизации пограничного слоя исключается, что заведомо имеет место при $Re < 10^4$, ктеноидный аппарат не нужен. При этих значениях мы, как правило, действительно, не встречаем рыб с ктеноидной чешуей ни в филогенезе, ни в онтогенезе.

При медленном движении крупных рыб с ктеноидной чешуей развитый ктеноидный аппарат находится в пограничном слое именно при условии $Re < 10^4$ и вообще при сколь угодно малых значениях Re , поскольку скорость любой крупной рыбы может сколь угодно близко приближаться к нулю. В этом случае ктеноидный аппарат не выполняет какой-либо полезной функции, поскольку течение в пограничном слое осталось бы ламинарным и при отсутствии ктеноидов. Однако присутствие в пограничном слое ктеноидов в этих условиях не вредно, поскольку они представляют собой структуры весьма хорошо обтекаемые, имеющие вид гладких конических шипов, расположенных наклонно, вершинами назад, под углом не более 10° к поверхности тела.

В условиях зарождающейся турбулентности, при $Re > 10^4$, когда ламинарное состояние пограничного слоя становится уже весьма неустойчивым (Шлихтинг, 1956, 1962), ктеноидный аппарат работает по принципу спрямляющей решетки, выполняя функции ламинаризатора, предотвращающего развитие зарождающихся турбулентных токов (Бурдак, 1968). В условиях развитой турбулентности, когда ламинарность пограничного слоя уже не может быть сохранена, ктеноидный аппарат выполняет функцию употребляемых в аэро- и гидромеханике сеточных фильтров, размельчающих вихри, т. е. превращающих крупные вихри в мелкие и тем самым способствующих уменьшению степени турбулентности. Известно (Мартынов, 1958), что в практике экспериментальной аэро- и гидромеханики подобные фильтры применяются для уменьшения степени турбулентности с большим успехом. Эти фильтры представляют собой обычные проволочные сетки большой густоты, составленные из тонких проволок (диаметр проволоки 0,1—0,15 мм). Степень размельчения вихрей тем значительнее, чем мельче размеры ячеек сеточного фильтра. Последнее интересно сопоставить с известным фактом (Бурдак, 1968) ветвления ктеноидов, которое из исследованных нами рыб наблюдается, в частности, у *Mullus* и *Pomadasis*: за счет ветвления ктеноидов осуществляется усиление ламинаризирующего действия ктеноидного аппарата подобно тому, как это имеет место при уменьшении ячеек сеточного фильтра. В связи с этим следует отметить, что ветвление ктеноидов усиливается с увеличением размеров рыб, т. е. с увеличением чисел Рейнольдса, когда можно ожидать усиления степени турбулентности течения в пограничном слое.

Очевидно, что все эти функции ктеноидный аппарат выполняет и у одной и той же рыбы при разных режимах движения. Если, например, у лобана (*Mugil cephalus* L.) абсолютной длиной 70 см максимальная скорость движения составляет, согласно нашим определениям, около 7 м/сек и максимальное значение числа Рейнольдса примерно равно $5,0 \cdot 10^6$, то это означает, что на разных участках тела рыбы при разных скоростях плавания имеют место весьма различные режимы течения в пограничном слое, от типично ламинарного до типично турбулентного. Поэтому при $Re < 10^4$ у рассматриваемого экземпляра ктеноидный аппарат не функционирует, при увеличении Re выполняет функции ламинаризатора, вначале — путем предотвращения самого возникновения турбулентных токов, а при дальнейшем увеличении Re и усилении степени турбулентности — путем размельчения вихрей в турбулентном пограничном слое. Это объясняет нам, почему ктеноидная чешуя встречается в пределах достаточно широкого диапазона Re — примерно от 10^4 до 10^7 , т. е. в условиях заведомо различных режимов течения в пограничном слое.

В связи с этим необходимо подчеркнуть, что функции ктеноидов в условиях ламинарного и турбулентного пограничного слоев вполне аналогичны. В обоих этих случаях указанные функции направлены на упорядочение течения в пограничном слое, т. е. на ослабление хаотических движений в нем, не соответствующих основному направлению потока; различия состоят по существу лишь в том, что в одном случае течение в пограничном слое еще может быть приведено в ламинарную форму, тогда как в другом случае оно уже не может быть приведено в ламинарную форму, и ламинаризация может заключаться лишь в уменьшении степени турбулентности.

Тот факт, что в диапазоне Re от 10^4 до 10^7 , наряду с ктеноидной чешуей, встречается и циклоидная, отвечает множественности возможных направлений адаптации. Ктеноидный аппарат представляет собой только один из способов управления течением в пограничном слое. У рыб с циклоидной чешуей также имеется эффективный способ управления пограничным слоем, но построенный на иной основе, чем у рыб с ктеноидной чешуей, возможно, — на основе того принципа, который описывают А. Ф. Кудряшов и В. В. Барсуков (1967, 1967а), проводя аналогию между чешуйным покровом рыб и поверхностью, сформированной вихревым потоком.

Итак, мы приходим к выводу, что ктеноидный аппарат рыб сохраняет свое полезное значение в весьма широких пределах чисел Рейнольдса, примерно от 10^4 до 10^7 . Причина этого заключается в том, что система ктеноидов способна выполнять свою ламинаризаторную функцию как в условиях зарождающейся турбулентности, так и в условиях развитой турбулентности. В обоих случаях эта функция отвечает функционированию ктеноидного аппарата в качестве спрямляющей решетки или сеточного фильтра и направлена в конечном счете на снижение общего гидродинамического сопротивления, встречаемого рыбой при движении.

ЛИТЕРАТУРА

- Бурдак В. Д., 1968. О функциональном значении ктеноидов на чешуе рыб, Зоол. ж., 47, 5: 732—738.
- Кудряшов А. Ф. и Барсуков В. В., 1967. О гидродинамической роли чешуйного покрова рыб как аналога поверхностей, непосредственно сформированных вихревым потоком. Сообщение 1. Сходство неровностей чешуйного покрова с неровностями на поверхностях, сформированных потоком в руслах рек, Зоол. ж., 46, 3: 393—403.—1967а. О гидродинамической роли чешуйного покрова рыб как аналога поверхностей, непосредственно сформированных вихревым потоком. Сообщение 2. Гидродинамическая функция чешуйного покрова, Зоол. ж., 46, 4: 556—566.
- Мартынов А. К., 1958. Экспериментальная аэродинамика: 1—348, Оборонгиз, М.
- Шлихтинг Г., 1956. Теория пограничного слоя: 1—528, Изд-во иностр. лит., М.—1962. Возникновение турбулентности: 1—203, Изд-во иностр. лит., М.

ON THE FUNCTIONING OF CTENOID APPARATUS IN FISH UNDER THE CONDITIONS OF TURBULENT BORDER LAYER

V. D. BURDAK

Institute of Biology of Southern Seas, Academy of Sciences of the Ukrainian SSR (Sebastopol)

Summary

A hydrodynamic function of ctenoids on fish scales under different states of border layer within the range of Reynolds numbers from 10^4 to 10^7 is regarded. It has been shown that the ctenoid apparatus is able to function as a laminariser under the conditions of both laminary and turbulent border layers at different degree of turbulence. In all cases functions of ctenoid apparatus are aimed at decrease of hydrodynamic resistance met by a moving fish.