

О РОЛИ ВИХРЕОБРАЗОВАНИЯ В ЛОКОМОЦИИ РЫБ И ВЛИЯНИИ ГРАНИЦЫ ДВУХ СРЕД НА КАРТИНУ ОБТЕКАНИЯ

Ю. Г. АЛЕЕВ и О. П. ОВЧАРОВ

Институт биологии южных морей Академии наук Украинской ССР
(Севастополь)

Рассматривается визуализированная картина обтекания трех видов пелагических рыб — *Trachurus mediterraneus ponticus* Aleev, *Spicara smaris* (L.) и *Chalcalburnus chalcoides* Berg в диапазоне величин Re от $6,0 \cdot 10^4$ до $2,4 \cdot 10^5$. У всех рыб установлено безотрывное обтекание тела. Разбирается вопрос о влиянии дыхания на нестационарность картины обтекания. Показано влияние близости границы двух сред (вода — воздух), искажающее истинную картину обтекания; в этом случае у тела рыбы образуются крупные вихри, связанные с общим отрывом пограничного слоя.

Как уже было показано (Алеев и Овчаров, 1969), представление об интенсивном вихреобразовании у тела движущейся рыбы (Шулейкин, 1934; Rosen, 1959, 1961; Breder, 1965; Hartel, 1967 и др.) основано на исследовании картин обтекания, искаженных условиями эксперимента, а именно — картин, полученных под влиянием на процесс обтекания стенок бассейна, поверхности воды или границы двух жидкостей с различной плотностью.

Наиболее всесторонне «вихревая» теория движения рыб была сформулирована Розеном (1959, 1961), по мнению которого представление о системе вертикальных вихрей должно считаться основной гипотезой локомоции рыб. Гипотеза Розена была благосклонно и, к сожалению, недостаточно критично принята многими исследователями как за рубежом, так и у нас; Бредер (1965), основываясь на данных Розена, построил даже свою теорию движения рыб в стае. Несостоятельность гипотезы Розена, определяемая ошибочностью исходных экспериментальных данных и теоретических обоснований, уже была детально рассмотрена нами (Алеев и Овчаров, 1969).

Аналогичные методические погрешности имели место и в экспериментах Гертеля (1967), который также изучал картину обтекания рыб — форели и угря — вблизи поверхности воды и получил соответственно результаты, близкие к данным Розена (1959, 1961). Для визуализации картины обтекания в опытах Гертеля применялись специальные взвеси и порошки, посыпаемые на поверхность воды. Очевидно, что констатированные в опытах Гертеля вихри в гидродинамических следах за форелью и угрем не дают достаточных оснований для каких-либо заключений о вихреобразовании непосредственно у тела рыбы. Отмечаемые Гертелем циркуляционные движения у тела форели, плывущей между двумя заборрами из колышков, возле которых хорошо видны поверхностные явления, представляют собой артефакт, вызванный близостью поверхности воды. Как уже было показано (Алеев и Овчаров, 1969), с применением более объективной методики визуализации потока при плавании той же самой форели в толще воды, на достаточном удалении от водной поверхности,

никаких вихрей и никакой циркуляции у тела рыбы нет, тогда как вихри, имеющиеся в следе, прослеживаются весьма четко.

Чтобы избежать ошибок Розена и Гертеля в дальнейших исследованиях, большой интерес представляло бы более точное выявление границ возникновения гидродинамических артефактов, искажающих естественную картину обтекания нектеров. Это имеет особенно важное значение в связи с тем, что экспериментальное изучение обтекания нектеров по существу только начинается, и целесообразно с самого начала приложить максимальные усилия к искоренению возможных принципиальных методических ошибок. В этом плане необходимо прежде всего экспериментально показать, при каких нарушениях истинной картины обтекания у тела движущейся рыбы возникает система вертикальных вихрей, сфотографированных Розеном (1959, 1961) в опытах с *Brachidanio*.

В экспериментах, проведенных нами в 1967 и 1968 гг., уже было показано (Алеев и Овчаров, 1969), что при движении самых разнообразных рыб в толще воды, при достаточном удалении от стенок бассейна и поверхности воды, у тела рыбы не возникает каких-либо вихрей, связанных с общим отрывом пограничного слоя: на всем протяжении тела рыбы, включая и весь хвостовой плавник, имеет место лишь безотрывное обтекание, ламинарное на конфузорном участке и турбулентное на диффузорном. В 1969 г. эти исследования были продолжены с применением прежней методики визуализации обтекающего потока (Алеев и Овчаров, 1969) на более быстрых пелагических рыбах: смариде — *Spicara smaridis* (L.), ставриде — *Trachurus mediterraneus ponticus* Aleev и шемае — *Chalcalburnus chalcoides* Berg. На этот раз нам удалось не только получить истинную картину обтекания исследованных рыб при движении их в естественной обстановке, т. е. в толще воды, но и моделировать основной артефакт, имевший место в опытах Розена (1959, 1961) и явившийся основой для построения вихревой гипотезы движения рыб, т. е. систему вертикальных вихрей.

Опыты проводились в специальном гидроканале, имеющем длину 4, ширину 0,4 и высоту 0,4 м при глубине рабочего слоя около 0,3 м. При таких размерах канала, учитывая, что длина исследованных рыб не превышала 22,0 см, можно с достаточной уверенностью говорить об отсутствии влияния стенок канала и поверхности воды на характер обтекания движущейся рыбы. Опыты, в которых рыба двигалась вблизи стенок, канала, выбраковывались. Регистрация процессов обтекания в экспериментах производилась киноаппаратом «Конвас» на 35-миллиметровую пленку. Скорость движения рыб в опытах варьировала от 0,4 до 1,5 м/сек, что соответствует числам Рейнольдса от $6,0 \cdot 10^4$ до $3,3 \cdot 10^5$.

Эксперименты 1969 г., как и опыты прошлых лет (Алеев и Овчаров, 1969), показали, что на всех режимах плавания, при условии, что рыба плыла на достаточном расстоянии от стенок канала и от поверхности воды, образования крупных отрывающихся вихрей, аналогичных тем, которые наблюдал Розен (1959, 1961), вдоль тела рыбы не происходит (рис. 1—5). Только в гидродинамическом следе за телом рыбы при выполнении ею активных плавательных движений на режимах Re $1,2 \cdot 10^5$ начинается свертывание следа в вихри с малой величиной вращающего момента; направление вращения вихрей соответствует активному движению рыбы, т. е. след представляет собой реактивную струю (рис. 1, а, б). При инерционном движении, даже на больших скоростях плавания, вихреобразования в следе не происходит, остающийся за рыбой след постепенно размывается путем медленных беспорядочных смещений составляющих его масс воды в разных направлениях (рис. 1, в, г). Следовательно, мы можем сделать вывод о том, что вихреобразование в гидродинамическом следе вызвано работой локомоторного аппарата рыбы.

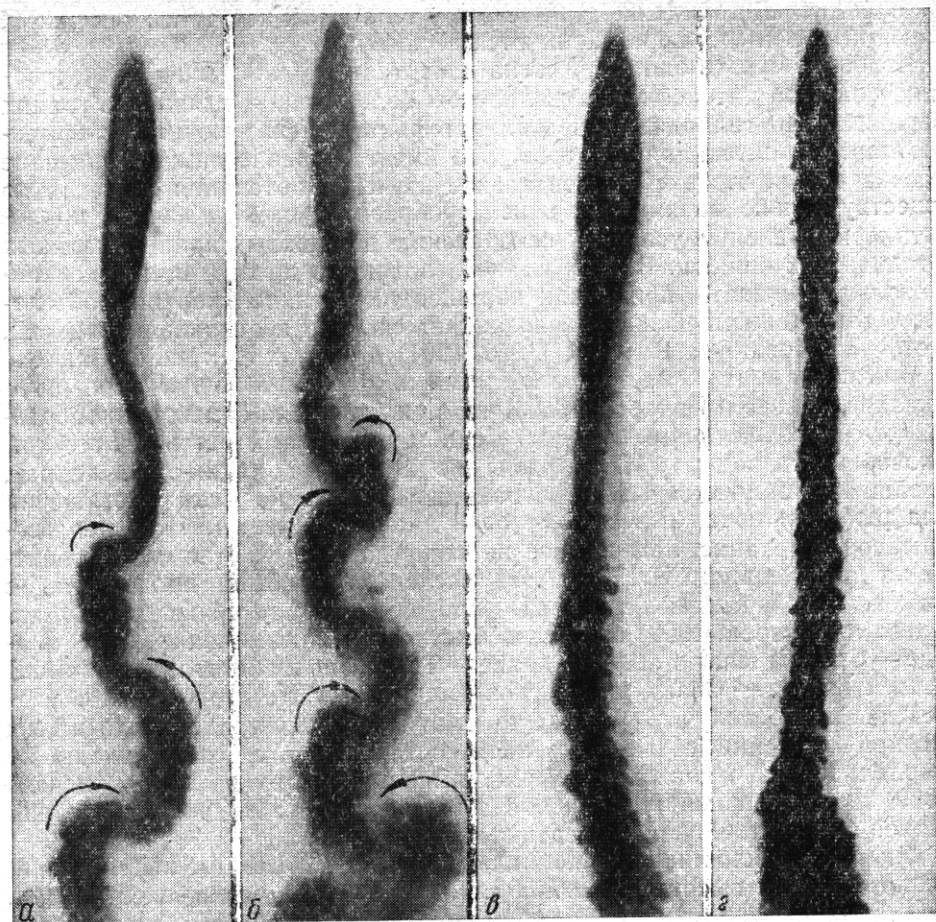


Рис. 1. Визуализированная картина движения рыб

а, б — активное движение, *в, г* — инерционное движение; *а* — *Chalacalburnus chalcoides*, $L_a = 15,0$ см, $V = 90$ см/сек, $Re = 1,3 \cdot 10^5$; *б* — *Spicara smaris*, $L_a = 13,2$ см, $V = 90,0$ см/сек, $Re = 1,2 \cdot 10^5$; *в* — то же, $L_a = 16,0$ см, $V = 150,0$ см/сек, $Re = 2,4 \cdot 10^5$; *г* — *Trachurus mediterraneus ponticus*, $L_a = 12,5$ см, $V = 105,0$ см/сек, $Re = 1,3 \cdot 10^5$. Изогнутые стрелки указывают направление вращения вихрей в следе

Когда рыба проходит близко к поверхности воды, можно получить картину (рис. 2), аналогичную той, которую получил Розен (1959, 1961) в опытах с *Brachidanio*. На рис. 2 отчетливо видно, как в этом случае при активном плавании рыбы на боках тела, во впадинах локомоторной волны, попеременно возникают вихри с вертикальной осью, которые по мере продвижения вдоль тела увеличиваются: направление вращения этих вихрей (рис. 2, *а, б*) показывает, что они связаны с обратными движениями в пограничном слое и его отрывом у боковых поверхностей тела рыбы, т. е. направление вращения их обратно тому, которое мы наблюдаем в реактивной струе за рыбой (рис. 1, *а, б*). Таким образом, в рассматриваемом случае наблюдается принципиально иная система вертикальных вихрей, нежели та, которую мы видим в следе за рыбой, активно движущейся на достаточном удалении от поверхности воды. При движении же рыбы в непосредственной близости от поверхности воды мы имеем дело не с истинной картиной, характерной для плывущей рыбы, а с артефактом, вызванным близостью границы двух сред с огромной разностью плотностей — воды и воздуха. Иначе говоря, образование системы вертикальных вихрей отрыва является прямым следствием близости плывущей рыбы к поверхности воды, т. е. пред-

ставляет собой частный и притом совершенно не типичный случай картины обтекания, который в силу этого не может служить основанием для каких-либо заключений о закономерностях работы локомоторного аппарата рыбы и ее движения в естественных условиях.

Полученные нами экспериментальные данные полностью подтверждают правильность выдвинутой ранее интерпретации (Алеев и Овчаров, 1969) картины обтекания *Scomber scombrus* L. в трактовке В. В. Шулейкина (1934) и результатов опытов Розена (1959, 1961) для *Brachidanio*. Суть данной интерпретации заключается в том, что фотографии скумбрии были сделаны (Gray, 1933) в мелководной ванне, поэтому свили, отмеченные В. В. Шулейкиным (1934), представляют собой не что иное, как поверхностный эффект, вызванный близостью границы двух сред. Аналогичные недостатки имели место и в экспериментах Розена. Розен (1959, 1961) пускал рыбку длиной 4,1 см в лоточке шириной около 4,0 см при глубине рабочего слоя воды всего 2,5 см. Совершенно ясно, что в данном случае имело место четко выраженное влияние как стенок лоточка, так и поверхности воды. Кроме того, нахождение на дне лоточка слоя молока толщиной около 1,5—1,6 мм, с помощью которого вихри становились видимыми на черном фоне дна лотка, приводило к тому, что рыба двигалась непосредственно на границе двух жидкостей с разной плотностью, и образующиеся вихри были результатом тех возмущений, которые возникали на границе этих двух сред.

В связи с этим целесообразно напомнить, что образование вихрей вызывает резкое повышение сопротивления движущемуся в воде телу и всегда связано со значительной потерей энергии. Поэтому вся организация рыб направлена на то, чтобы подавить процессы вихреобразования (Алеев, 1963).

Пограничный слой у всех исследованных нами рыб на всех режимах плавания был смешанным, состоящим из ламинарного и турбулентного участков (рис. 3—5). Благодаря применению киносъемки удалось хорошо проследить установленный ранее факт влияния дыхания рыбы (Алеев и Овчаров, 1969) на нестационарный характер пограничного слоя.

При сравнительно небольших скоростях плавания, соответствующих примерно 4—5 длинам в секунду, у смариды и ставриды наблюдался смешанный тип дыхания, т. е. после акта активного дыхания, состоящего из очень неглубокого вдоха и выдоха, следовал четко выраженный период чисто пассивного дыхания, когда жаберные крышки оставались слегка приоткрытыми и вода самотеком проходила через ротовую и жаберную полости и выходила через жаберные щели, затем снова следовал акт активного дыхания и т. д. Во время активного выдоха возмущенная вода, выходящая из жаберных щелей, турбулизировала пограничный слой практически сразу же за жаберными крышками, так что в этот момент ламинарным остается передний участок, составляющий

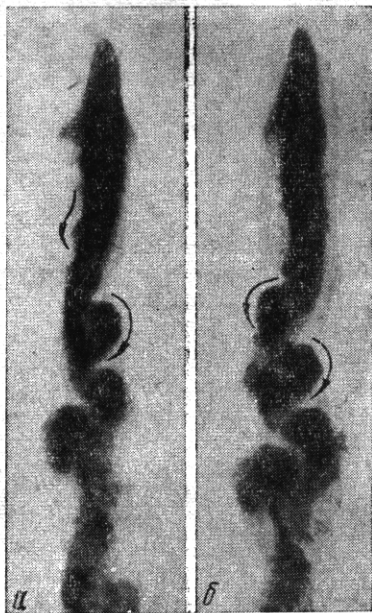


Рис. 2. Визуализированная картина движения *Chaicalburnus chalcooides* у поверхности воды

а, б — последовательные кадры киносъемки; $L_a=11,9$ см, $V=40,0$ см/сек, $Re=4,8 \cdot 10^4$. Видны развивающиеся вихри отрыва. Остальные обозначения те же, что на рис. 1

около 30% от абсолютной длины рыбы (рис. 3,а; 4,а). После прекращения активного выдоха наступает период пассивного дыхания, во время которого верхняя граница турбулентного участка постепенно сдвигается

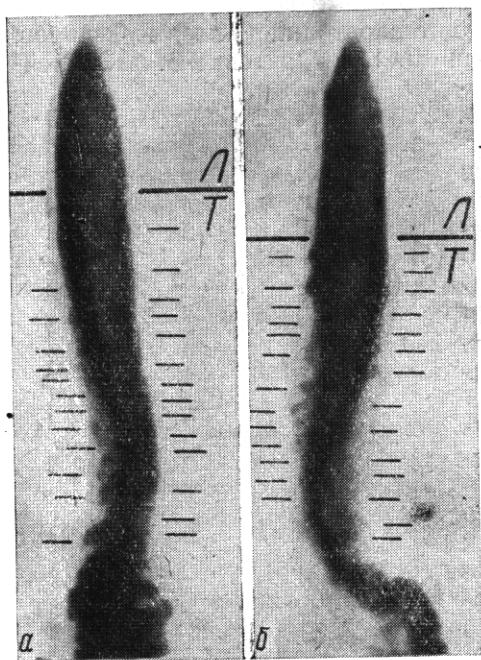


Рис. 3. Ламинарный (L) и турбулентный (T) участки пограничного слоя у *S. smaris* при смешанном типе дыхания

а — момент активного выдоха; б — момент пассивного дыхания; штрихами отмечены отдельные микровilli в турбулентном участке пограничного слоя ($L_a=15,5$ см, $V=75,0$ см/сек, $Re=1,2 \cdot 10^3$)

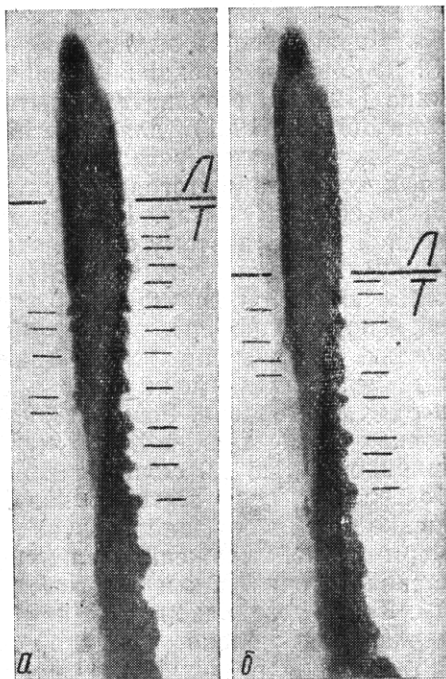


Рис. 4. Ламинарный (L) и турбулентный (T) участки пограничного слоя у *Trachurus mediterraneus ponticus* при смешанном типе дыхания

а — момент активного выдоха, б — момент пассивного дыхания; $L_a=15,2$ см, $V=57,1$ см/сек, $Re=8,6 \cdot 10^4$; остальные обозначения см. на рис. 3

вниз по потоку (рис. 3,б; 4,б), и перед следующим актом активного дыхания длина ламинарного участка пограничного слоя у смариды и ставриды может достигать 45—55% от абсолютной длины рыбы.

Проведенные наблюдения подтверждают высказанный ранее тезис (Бурдак, 1969) о турбулизирующем влиянии работающего жаберного аппарата рыбы на пограничный слой. У смариды и ставриды даже при прижатых к телу жаберных крышках через жаберные щели сохраняется некоторый проток воды (рис. 3,б и 4,б), т. е. наблюдается положение, свойственное рыбам с пассивным способом дыхания, что отвечает экологическим особенностям пелагических смариды и ставриды. Как отмечает В. Д. Бурдак (1969), при пассивном типе дыхания у таких рыб, как Scombridae, наличие постоянного протока воды через жаберные щели препятствует возникновению за кромками жаберных крышек зон разрежения, благодаря чему у таких рыб турбулизации пограничного слоя за жаберными крышками не происходит. Именно это мы и наблюдаем в моменты пассивного дыхания у смариды и ставриды: при наличии пассивного протока воды через жаберные щели сзади жаберных крышек мы видим у них ламинарные участки пограничного слоя, за счет чего граница между ламинарным и турбулентным участками пограничного слоя перемещается назад.

При скоростях, близких к максимальным, которые в наших случаях составляли для ставриды около 9,6 длин в 1 сек и для смариды около

9,3 длины в 1 сек, наступает пассивный тип дыхания, поступление воды из жаберных щелей становится равномерным, и положение места турбулизации пограничного слоя становится более или менее постоянным.

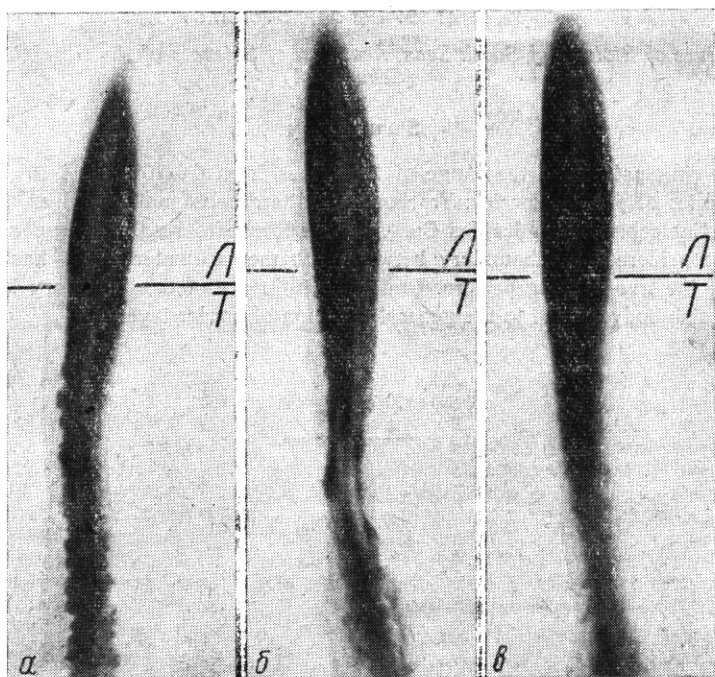


Рис. 5. Ламинарный (Л) и турбулентный (Т) участки пограничного слоя при пассивном типе дыхания

а — *S. smarís*, $L_a=16,0$ см, $V=150,0$ см/сек, $Re=2,4 \cdot 10^5$, инерционное движение; б — *Trachurus mediterraneus ponticus*, $L_a=15,6$ см, $V=150,0$ см/сек, $Re=2,3 \cdot 10^5$, активное движение; в — то же, инерционное движение

В этом случае как у смариды, так и у ставриды при активном (рис. 5, б) и при инерционном (рис. 5, а, в) движении ламинарный участок пограничного слоя достигает середины тела, а затем идет ясно-видимый турбулентный участок.

ЛИТЕРАТУРА

- Алеев Ю. Г., 1963. Функциональные основы внешнего строения рыбы: 1—247, Изд-во АН СССР, М.
- Алеев Ю. Г. и Овчаров О. П., 1969. О развитии процессов вихреобразования и характере пограничного слоя при движении рыб, Зоол. ж., 48, 6: 781—790.
- Бурдак В. Д., 1969. Онтогенетическое развитие чешуйного покрова кефали — *Mugil saliens* Risso, Зоол. ж., 48, 2: 241—247.
- Шулейкин В. В., 1934. Внешняя и внутренняя динамика рыбы, Изв. АН СССР, 7, отд. матем. и естеств. наук, 8: 1151—1186.
- Breder C. M. 1965. Vortices and fish schools, Zoologica, 50, 3—1: 97—112.
- Gray J., 1933. Studies in animal locomotion. I. The movement of the with special reference to the eel, J. Exptl. Biol., 10, 1: 88—104.
- Hertel H., 1967. Gekoppelte Biege- und Drehschwingungen als Antrieb, VDI-Z, 109, 26: 1215—1221.
- Rosen M. W., 1959. Water flow about a swimming fish, Stat. Techn. Pull U. S. Haval Ordh. Test Station, California, Notes TP 2298, i—v: 1—94.—1961. Experiments with swimming fish and dolphins, Paper. Amer. Soc. Mech. Engrs. NWA—203: 1—11.

THE ROLE OF VORTEX FORMATION IN LOCOMOTION OF FISH AND THE INFLUENCE OF THE BOUNDARY BETWEEN TWO MEDIA UPON THE FLOWING PATTERN

Yu. G. ALEEV and O. P. OVCHAROV

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

Summary

The flowing pattern in the range of Re values from $6.0 \cdot 10^4$ to $2.4 \cdot 10^5$ is visualized in three species of pelagic species: *Trachurus mediterraneus ponticus* Aleev, *Spicara smaris* L. and *Chalcaburnus chalcoides* Berg. The influence of respiration upon the flowing pattern is considered. The boundary between two media (water — air) has been shown to influence the true flowing pattern. Under the influence of this boundary large vortices form at the fish body related to the general isolation of border layer.
