

**О ВОЗМОЖНОСТИ ВЛИЯНИЯ СЛИЗИ НА ГИДРОДИНАМИЧЕСКОЕ  
СОПРОТИВЛЕНИЕ РЫБ**А. С. ВАСИЛЬЕВ, А. Ф. ИЛЬИЧЕВ, Е. Д. КАЗБЕРУК,  
А. Б. ЦИНОБЕР

(Калининград, Рига)

По свидетельству ряда авторов [1], рыбы, как и многие морские животные, помимо оптимальной с точки зрения гидродинамического сопротивления формы тела располагают еще и некоторым механизмом снижения сопротивления движения. В существующих гипотезах, претендующих на объяснение этого явления, значительная роль отводится слизи. Так, согласно одной из этих гипотез, в растворе слизи в воде реализуется эффект Томса [2]. В другой гипотезе акцентируется большая устойчивость пограничного слоя переменной вязкости по сравнению с обычным пограничным слоем [3]. Однако анализ характерных размеров и скоростей плавания большинства пресноводных и морских рыб показывает, что за редкими исключениями (например, *Selachii*) переход к турбулентности в пограничном слое при обычных условиях либо вообще не должен происходить, либо турбулентный режим существует только в окрестностях хвоста [4].

В настоящее время в литературе имеется достаточно много противоречивых работ, посвященных выяснению вопроса влияния слизи на гидродинамическое сопротивление рыб. Так, если в работах [5, 6] гидродинамическая функция слизи почти полностью отрицается, то в [7-9] приводятся данные, на основании которых авторы считают, что слизь способствует уменьшению сопротивления трения.

В связи с вышеизложенным, заслуживают выяснения вопросы о том, может ли благодаря слизи существенно снижаться вязкость воды и может ли наличие слоя переменной вязкости обуславливать существенное снижение трения.

1. Приведем результаты некоторых модельных расчетов<sup>1</sup>. Рассмотрим аналог задачи Блазиуса об обтекании полубесконечной пластины для случая, когда на поверхности пластины задана концентрация некоторого вещества, способного уменьшать вязкость образующегося раствора. Предполагая, что уменьшение вязкости пропорционально изменению концентрации и величине вязкости, получим, что вязкость изменится по экспоненциальному закону  $\nu = \nu_0 \exp(-\epsilon c)$ , где  $c$  — концентрация вещества.

Вводя переменную Блазиуса, приходим к краевой задаче для системы обыкновенных дифференциальных уравнений, которая интегрировалась численно на ЭВМ GE-45 для различных значений диффузионного числа Прандтля  $Pr_d$  (0.1, 1.0, 10) и  $\epsilon$  (0.1, 0.5, 1.0, 2.0). Расчеты показали, что заметное влияние изменения вязкости наблюдается лишь при сравнительно больших  $\epsilon$ , тогда как при  $\epsilon = 0.1$  и  $Pr_d = 1 \div 10$  отличие от обычного течения при  $\nu = \nu_0 = \text{const}$  не превышает 2%. В частности, для снижения трения на поверхности пластины на 20% необходимо уменьшение вязкости в несколько раз.

2. Перейдем теперь к рассмотрению результатов экспериментов по изучению вязкости растворов слизи рыб. Приведем лишь некоторые из многочисленных опытов, в которых наблюдалась повторяемость результатов. Через несколько минут после вылова рыбы тралом с ее поверхности осторожно отбиралась слизь, а затем приготавливался ряд разбавленных водой растворов с концентрацией слизи  $10^{-2}$ ,  $10^{-1}$ ,  $2 \cdot 10^{-1}$ , 1,5%. На фиг. 1 приведены опытные данные, показывающие изменения относительной вязкости растворов слизи щуки в зависимости от времени после приготовления растворов. Кривые 1-5 соответствуют концентрациям раствора  $10^{-2}$ ,  $10^{-1}$ ,  $2 \cdot 10^{-1}$ , 1,5%. Заметим, что погрешность в измерении относительной вязкости (вязкость измерялась по времени истечения) растворителя в экспериментах составляла 2-3%.

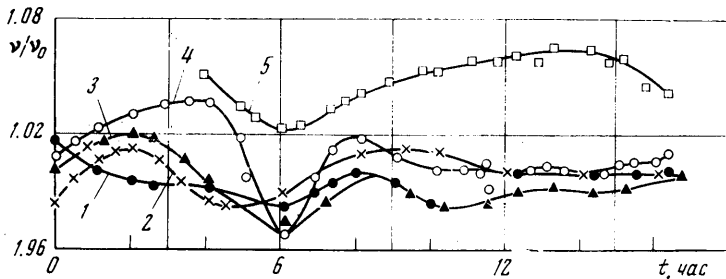
Таким образом, из экспериментов видно, что снижение вязкости воды за счет растворения в ней слизи не превышает нескольких процентов. Как показали расчеты, такое уменьшение вязкости вообще не может привести к заметному уменьшению сопротивления. Сопоставление опытных и расчетных данных показывает, что в ламинарном режиме уменьшение затрат энергии при плавании рыб за счет слизи, по-видимому, не играет сколько-нибудь заметной роли.

3. Рассмотрим далее оценку сил сопротивления трения при движении по инерции пластины, эквивалентной телу рыбы, с заданной начальной скоростью. Приведем также аналогичные экспериментальные данные, полученные путем кино съемки при свободном плавании рыбы на участке ее движения по инерции. Такие опыты заслуживают особого внимания, так как они лишены какого-либо постороннего вмешательства

<sup>1</sup> Об этих расчетах упоминается в примечании к стр. 99 работы [10].

в гидродинамику исследуемого объекта и, значит, не могут оказывать влияние на возможную гидродинамическую феноменальность слизи.

Силу, действующую на пластину эквивалентной рыбе формы и равной ей по площади, можно рассчитать, исходя из предположения, что на каждую элементарную площадку пластины, расположенную вдоль набегающего потока, действует сила трения Блазиуса. Учитывая, что при движении рыбы по инерции никакие другие силы, кроме сил трения, на рыбу не действуют, можно проинтегрировать уравнение движе-



Фиг. 1

ния рыбы и найти зависимость пройденного ею пути от времени. В безразмерных величинах эта зависимость выглядит следующим образом:

$$S_* = t_* (1 + 0.5 t_*)^{-1}, \quad S_* = k \delta u_0^{-1/2}, \quad t_* = k u_0^{1/2} t$$

$$k = 0.664 m^{-1} \rho v^{1/2} L, \quad L = \int_0^a l_y^{1/2} dy$$

где  $u_0$  — начальная скорость рыбы,  $l_y$  — текущий размер рыбы вдоль направления ее движения,  $a$  — максимальная ширина рыбы поперек направления ее движения.

Перейдем теперь к эксперименту и его сопоставлению с расчетом. Движение свободно плавающей рыбы в открытом канале  $1.8 \times 0.5 \times 0.5$  м<sup>3</sup>, изготовленном из оргстекла, фиксировалось путем киносъемки. Из всех отснятых кадров тщательно отбирались только те, которые соответствовали движению рыбы с углом дифферента, равным нулю. Поэтому, а также в силу многочисленных экспериментальных данных [11] плавать исследуемых особей карася (*Carassius carassius* (L)) и карпа (*Cyprinus carpio* (L)) принималась равной нулю.

Отметим одно важное обстоятельство. При внимательном наблюдении за плаванием рыбы даже, казалось бы, при движении по инерции (хвостовой плавник без видимого движения) видны почти непрерывные, похожие на работу гребных винтов, движения грудных плавников. Именно этим можно объяснить внезапные торможения, остановки [12], а иногда даже движения назад. Понятно, что поставленная задача могла быть выполнена только после ампутации грудных плавников, что приводило, как правило, к потере устойчивости рыбы и появлению дифферента на «нос». Однако путем отбора из большого числа особей удалось выделить несколько необходимых для исследования рыб.

Как показал расчет, если принять форму тела за трехосный эллипсоид вращения [13], то присоединенная масса воды для исследуемых карпа и карася составила ~7% их собственных масс, т. е. суммарная масса  $m = 1.07 m_0$ . Начальные скорости движения рыб изменялись в пределах 6–12 см/сек. Исследованию подвергались два вида рыб (по числу особей до 10 штук для каждого вида). Ниже приведены основные данные исследуемых рыб (карп — I, карась — II):

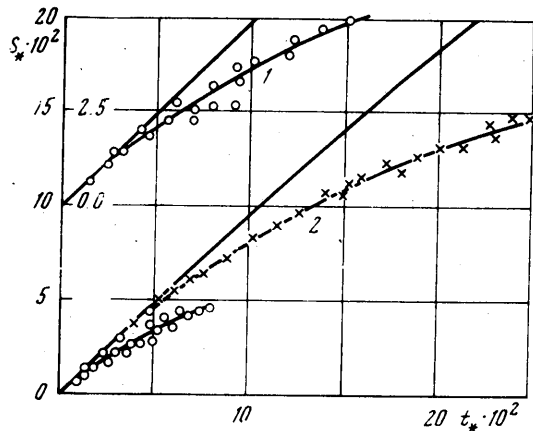
	$m_0, g$	$d$	$l$	$l_1$	$h$	$L$
I	138.5	3.15	18.8	3.6	6.5	28
II	8.7	1.2	6.7	1.9	2.3	5.4

где  $d$  — наибольший поперечный размер,  $l, l_1$  — длина рыб без учета хвостового плавника и длина плавника,  $h$  — высота без учета спинного плавника (все линейные размеры в см).

Число Рейнольдса, вычисленное по наибольшему размеру лобового сечения, для обоих видов рыб менялось в пределах  $2-4 \cdot 10^3$ . На фиг. 2 представлены экспериментальные результаты в безразмерных величинах, сопоставленные с расчетом (сплошная кривая — расчет, кривая 1 — движение карпа, кривая 2 — движение карася). Как видно из фиг. 2, сопротивление рыб оказывается не ниже, чем полученное для расчетной модели. Отметим, что сопротивление формы моделей с размерами исследуемых рыб не оказывает существенного влияния на общее сопротивление и по приближенным формулам работы [14] не превышает 8% сопротивления трения. Характерно, что для небольших значений времени движения имеет место хорошее совпадение эксперимента и расчета. Отклонение при больших значениях времени, а следовательно, при малых скоростях, вероятно, объясняется потерей устойчивости, появлением дифферента.

На основании приведенных результатов можно сделать вывод, что по крайней мере в инерционном режиме скольз не может приводить к существенному снижению сопротивления рыб.

В заключение заметим, что сравнение проводилось на трех участках движения, на которых снижение скорости не было столь большим, что приближение пограничного слоя теряло справедливость. Наименьшее число Рейнольдса составляло  $2 \cdot 10^3$ , что приводило к погрешности для силы сопротивления не более 3%.



Фиг. 2

Поступила 28 XI 1973

## ЛИТЕРАТУРА

1. Козлов Л. Ф., Пятецкий В. Е. Влияние сополомеров и рыбьей слизи на гидродинамическое сопротивление моделей и рыб. В сб. «Механизмы передвижения и ориентации животных». Киев, «Наукова думка», 1968.
2. Кобец Г. Ф. О механизме влияния растворенных макромолекул на турбулентное трение. В сб. «Бионика», вып. 3. Киев, «Наукова думка», 1969.
3. Калугин В. Н., Меркулов В. И. Возможный механизм уменьшения сопротивления у рыб. В сб. «Механизмы передвижения и ориентации животных». Киев, «Наукова думка», 1968.
4. Lighthill M. J. Hydromechanics of aquatic animal propulsion. Ann. Rev. Fluid Mech., vol. 1. Palo Alto, Calif., Annual Revs, 1969.
5. Richardson E. G. The physical aspects of fish locomotion. J. Experiment Biology, 1936, vol. 13, No. 1.
6. Gero D. R. The hydrodynamic aspects of fish propulsion. Amer. Museum Novitat., 1952, No. 1601.
7. Меркулов В. И., Хогинская В. Д. Механизмы уменьшения гидродинамического сопротивления у некоторых видов рыб. В сб. «Бионика», вып. 3. Киев, «Наукова думка», 1969.
8. Кобец Г. Ф., Завьялова В. С., Комарова М. Л. Влияние слизи рыб на турбулентное трение. В сб. «Бионика», вып. 3. Киев, «Наукова думка», 1969.
9. Пятецкий В. Е., Савченко Ю. Н. О влиянии слизи на гидродинамическое сопротивление рыб. В сб. «Бионика», вып. 3. Киев, «Наукова думка», 1969.
10. Лайтхилл М. Дж. Гидромеханика движения водных животных. Механика, Период. сб. перев. иностр. статей, 1972, № 1.
11. Алеев Ю. Г. Функциональные основы внешнего строения рыбы. М., Изд-во АН СССР, 1963.
12. Magnan A., Sainte-Lague A. Sur la détermination expérimentale de la résistance à l'avancement des Poissons. C. r. Acad. Sci., 1928, vol. 187, No. 24.
13. Войтунский Я. И., Першиц Р. Я., Тугов И. А. Справочник по теории корабля. Л., Судпромгиз, 1960.
14. Костюков А. А. Сопротивление воды движению судов. Л., «Судостроение», 1966.