

Наблюдением установлено, что в случае движения ламинарных вихрей (фиг. 2, б) в течение всего времени их движения ядро остается «пустым» и вся масса красителя сосредоточена вне ядра. Для турбулентных вихрей (фиг. 2, в) в начальной фазе их движения в ядре также содержится в основном жидкость среды, но в дальнейшем краситель заполняет ядро и потери его из ядра идут с меньшей интенсивностью, чем из всего остального объема. Отдельные опыты показывают, что при удалении вихрей на расстоянии до 150  $\delta$  вихрь становится трудно отличим от среды [5], так как происходит практически полное замещение жидкости, содержащейся в вихре, на жидкость среды. И лишь в кольцевом объеме, занятом ядром вихря, краситель задерживается несколько дольше.

В заключение автор благодарит В. И. Якушева и Л. Ф. Гладкову за помощь в проведении экспериментов и обработке их результатов.

Поступила 4 XI 1970

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Ламб Г. Гидродинамика. М.— Л., Гостехиздат, 1947.
2. Magarvey R. H., MacLatchy C. S. The formation and structure of vortex ring. *Canad. J. Phys.*, 1964, vol. 42, No. 4.
3. Ахметов Д. Г., Кисаров О. П. Гидродинамическая структура кольцевого вихря. ПМТФ, 1966, № 4.
4. Elder F. K. Jr., de Haas N. Experimental study of the formation of a vortex ring at the open end of cylindrical shock tube. *J. Appl. Phys.*, 1952, vol. 23, No. 10.
5. Бузуков А. А., Кузавов В. Т. Выпрыгивающие вихри. В сб. «Динамика сплошной среды», Новосибирск, «Наука», 1969, вып. 3.
6. Луговцов А. А., Луговцов В. А., Тарасов В. Ф. О движении турбулентного вихревого кольца. В сб. «Динамика сплошной среды», Новосибирск, «Наука», 1969, вып. 3.
7. Левич В. Г. Физико-химическая гидродинамика М., Физматгиз, 1959.

#### К ОПРЕДЕЛЕНИЮ ГИДРОДИНАМИЧЕСКОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ ДЕЛЬФИНА

*Т. Е. Алексеева, Б. Н. Семенов*

(Новосибирск)

В статье описываются некоторые результаты экспериментального определения гидродинамического сопротивления дельфина. Эти результаты сравниваются с расчетными значениями для установившегося движения подобной жесткой модели и уточняют данные о гидродинамическом сопротивлении афалины, полученные в работе [1]. Сопротивление дельфина оказалось значительно меньше расчетного, даже с учетом начального ламинарного участка. Из анализа полученных результатов делаются следующие выводы.

1. Экспериментальные результаты подтверждают с большой достоверностью существование гидродинамического феномена дельфина афалины.
2. Этим объясняется возникновение парадокса Грэя для данного рода животных.
3. По-видимому, явление, лежащее в основе метода снижения сопротивления дельфина, является регулируемым.

4. Можно предположить, что афалина имеет ламинарное безотрывное обтекание.

1. **Методика эксперимента.** Использованная ранее одним из авторов [1] методика в данном эксперименте была улучшена, в результате чего погрешность измерения сопротивления была уменьшена примерно в два раза. Ранее измерялось перемещение дельфина во времени и пространстве, затем дифференцированием по времени полученных данных определялись скорости и ускорения. Второе дифференцирование при этом проводилось с весьма значительными погрешностями. В данном же опыте скорость дельфина определялась из сравнения со скоростью эталонного шарика диаметром 6 мм, падающего в трубке с внутренним диаметром 12 мм и фиксируемого кино съемкой одновременно с перемещением животного.

Ускорение рассчитывалось как первая производная по времени замеренных скоростей движения дельфина. Эксперимент проводился с дельфинами рода *tursiops tursiops*

ponticus. Определялось сопротивление афалины на участке движения ее по инерции

$$R = (m + \lambda_{11}) a$$

Здесь  $a$  — ускорение торможения,  $m$  — масса дельфина, определяемая взвешиванием,  $\lambda_{11}$  — присоединенная масса воды при движении по направлению оси тела, определяемая расчетом [1].

Киносъемка движения дельфина и шариков производилась под водой тремя кинокамерами «Конвас-автомат», помещенными в металлические боксы. Оптические оси аппаратов были выставлены параллельно. Киносъемка проводилась на кинолентку ДС-5 объективами РО-70 с фокусным расстоянием  $F = 22$  мм. Для увеличения контрастности был применен белый экран.

Размещение оборудования аналогично описанному в работе [1]. Киноаппараты включались одновременно, управление дистанционное. Обработка пленок производилась следующим образом:

- 1) отбирались планы для обработки, при этом ставилось условием отсутствие поперечных движений хвоста;
- 2) определялся угол рысканья дельфина, оценивалось постоянство величины его, планы с переменным углом браковались;
- 3) определялся по длине животного размер плана и масштаб перемещений дельфина;
- 4) определялся масштаб перемещений шарика;
- 5) определялись перемещения афалины и шарика за 5 ÷ 7 кадров в зависимости от скорости движения животного; определение перемещений производилось многократно (30 ÷ 40 раз) для каждого плана, при этом рассчитывались среднее перемещение за эти 5 ÷ 7 кадров, средняя квадратическая и простая ошибки;
- 6) рассчитывались скорости движения дельфина  $U_1$  по формуле

$$U_1 = U_0 \frac{\Delta b}{\Delta h}$$

Здесь  $U_0$  — скорость шарика,  $\Delta b$  — перемещение афалины,  $\Delta h$  — перемещение шарика за тот же промежуток времени; рассчитывались погрешности определения скорости движения животного;

7) дифференцированием по времени полученных значений скорости рассчитывались ускорения и определялись погрешности расчета; численное дифференцирование производилось для каждого плана в  $n$  точках, в результате получали среднее ускорение, среднюю квадратическую и простую ошибки. Последние сравнивались с полученными выше, это служило оценкой достоверности расчета ошибки.

Далее по написанной выше формуле рассчитывалось сопротивление. Размеры животных были определены непосредственным обмером.

Несомненным достоинством использованной методики измерения сопротивления является то, что в процессе эксперимента на дельфинов не оказывалось никакого воздействия, и картина течения около тела не искажалась присутствием каких-либо датчиков и приспособлений. Однако весьма существенным недостатком данной методики является большой объем обработки измерений. Поэтому для тщательного исследования были отобраны наиболее интересные планы, а именно планы, на которых дельфины двигались с большой скоростью, при больших числах Рейнольдса.

2. Результаты эксперимента. Результаты измерения сопротивления афалины представлены на фиг. 1 и 2. На этих фигурах построен в функции от числа Рейнольдса  $Re$  коэффициент сопротивления по водоизмещению  $C_R$

$$C_R = \frac{2.10v^{1/3}}{U_1^2} a, \quad Re = \frac{U_1 L}{\nu}$$

Здесь  $v$  — объем дельфина,  $L$  — длина животного,  $\nu$  — кинематический коэффициент вязкости воды.

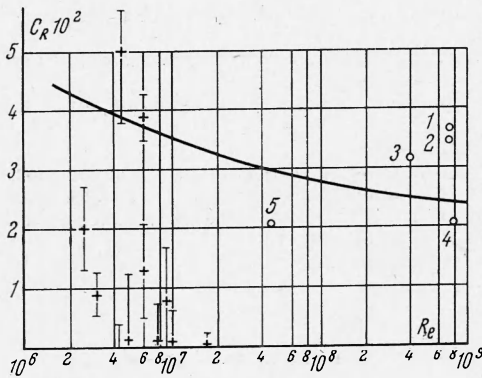
На фигурах приведены как новые результаты, полученные для дельфинов «Бася» и «Нептун», так и результаты экспериментов для дельфина «Смелая» из работы [1]. Крестом обозначено среднее значение для  $n$  точек, отрезки выше и ниже обозначают вероятно отклонение от среднего значения. Приводим количество экспериментальных точек  $n$  для каждого плана

№ плана	9—9	9—17	9—19	9—20	9—24
$n =$	28	18	39	50	9
	9—29	10—3	15—6	18—7	18—12
$n = 6$	26	46	34	72	65

Для сравнения на фиг. 1 изображены экспериментальные данные для американских подводных лодок и натурной торпеды [2].

1. Для подводной лодки «Наутилус», имеющей корпус классической формы 1 ( $L = 97.30$  м,  $U = 23$  узл.,  $L/d = 11.4$ ).
2. Для подводных лодок, наружные корпуса которых выполнены в виде хорошо обтекаемых тел вращения:
  - а) подводная лодка «Скипджек» 4 ( $L = 76.8$  м,  $U = 30$  узл.,  $L/d = 7.8$ );
  - б) подводная лодка «Таллиби» 3 ( $L = 79.5$  м,  $U = 15$  узл.,  $L/d = 8.9$ );
  - в) подводная лодка «Трешер» 2 ( $L = 85.0$  м,  $U = 25$  узл.,  $L/d = 10$ ).
3. Для торпеды МК-28, находящейся на вооружении ВМС США 5 ( $L = 6.25$  м,  $U = 23$  узл.).

Построена также расчетная кривая гидродинамического сопротивления для модели подводной лодки «Скипджек». Расчет проведен по известной методике [3] без учета шероховатости для случая турбулентного обтекания. Из сопоставления этих данных с результатами эксперимента для дельфина видно, что в девяти случаях из одиннадцати коэффициент сопротивления афалины оказался в несколько раз (2 ÷ 10) меньше коэффициента сопротивления лучшей модели подводной лодки.



Фиг. 1

Таким образом, можно сделать вывод, что в гидродинамическом отношении афалина, безусловно, совершенна. На фиг. 2 построены графики коэффициента сопротивления эквивалентного дельфину твердого тела при различных режимах обтекания. Верхняя кривая соответствует полностью турбулентному обтеканию тела дельфина. Расчет проведен по указанной выше методике [3] без учета шероховатости. При расчете предполагалось, что плавники имеют ламинарное обтекание. Угол атаки плавников равен нулю.

Сравнивая полученные данные с результатами расчета для модели подводной лодки «Скипджек», убеждаемся, что форма тела афалины, по-видимому, близка к оптимальной в данном случае, поскольку даже при турбулентном обтекании расчетные коэффициенты сопротивления модели дельфина оказываются примерно в полтора раза меньше коэффициентов для подводной лодки «Скипджек» при равных числах Рейнольдса.

Отметив важный факт оптимальности формы животного, следует заметить тем не менее из рассмотрения фиг. 2, что сопротивление дельфина значительно меньше сопротивления эквивалентной ему твердой модели. Наличие начального ламинарного участка несколько уменьшает значение расчетного коэффициента сопротивления, однако это уменьшение невелико [4] для чисел Рейнольдса больше  $6 \times 10^6$  при  $Re_* = 2 \times 10^6$ . В описываемом эксперименте получены результаты для чисел Рейнольдса несколько больше  $1.5 \times 10^7$ .

Таким образом, вывод [4] о существовании гидродинамического феномена дельфина афалины подтвержден новым экспериментом с большей достоверностью: во-первых, при меньшей (примерно в два раза) погрешности, во-вторых, для существенно больших чисел Рейнольдса, в-третьих, имеется теперь экспериментальное доказательство уже не для одного, а для трех представителей рода *tursiops ponticus*. Существование гидродинамического феномена и предполагает возникновение парадокса Грэя. В двух случаях из одиннадцати было, однако, зафиксировано сопротивление больше расчетного для эквивалентной дельфину модели при турбулентном обтекании. Если для плана 9-24 объяснением могло бы послужить наличие некоторого угла перекладки хвостового плавника, приводящего к увеличению сопротивления, то, анализируя план 15-6, нельзя указать веских причин. На этом плане дельфин движется горизонтально, угол перекладки хвостового плавника близок к нулю. Остается предположить, что явление, лежащее в основе низкого сопротивления афалины, является регулируемым.

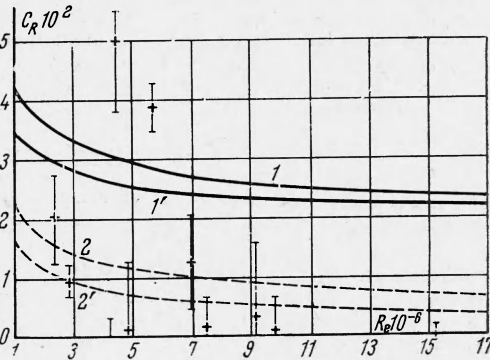
Проанализируем теперь некоторые гипотезы, предлагающие объяснение указанного гидродинамического феномена. Прежде всего рассмотрим модель тела животного. Из непосредственных наблюдений было установлено, что форма поперечного сечения дельфина есть эллипс. Причем на значительной длине эллипсность мала и форма сечения близка к кругу. Из условия равенства площадей в каждом сечении рассчитана равнобедренная модель тела вращения. Форма получена плавным замыканием. Построенное таким образом тело вращения приблизительно соответствует модели 25, для которой был произведен расчет на ЭВМ в ВЦ СО АН СССР характеристик потенциального обтекания и ламинарного пограничного слоя [4].

На фиг. 3 приведены для нее относительная скорость потенциального обтекания  $V$ , относительное избыточное гидродинамическое давление  $P$ , относительное ламинар-

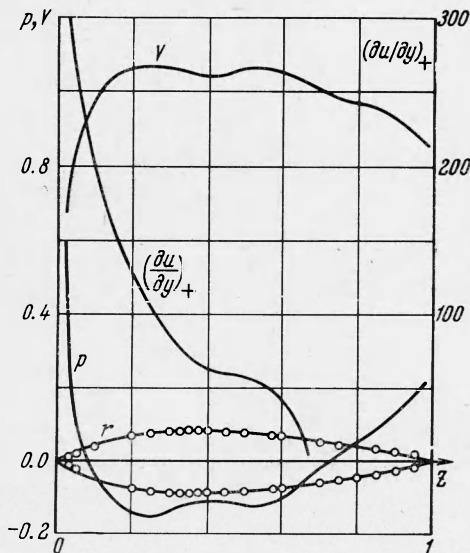
ное касательное напряжение на стенке  $(\partial u / \partial y)_+$ . М. Крамером была высказана гипотеза [6], согласно которой высокие скоростные качества дельфинов объясняются затяжкой ламинарного пограничного слоя в результате демпфирования пульсаций в нем за счет эластичности его поверхности.

Этот метод не предполагает изменения картины потенциального обтекания тела.

Таким образом, произведенный расчет должен быть справедлив и для ламинарного течения около эластичной границы. Однако при  $z = 0.696$  происходит отрыв ламинарного пограничного слоя, что приводит к большому дополнительному сопротивлению за счет невосстановления давления в корме. Расчет коэффициента сопротивления для этого случая иллюстрирован на фиг. 2 нижней сплошной кривой. Как видим, при наличии отрыва пограничного слоя ламинарное обтекание не приводит к существенному снижению полного сопротивления по сравнению с полностью турбулентным обтеканием. Если же удалось бы каким-либо методом, не увеличивающим энергзатрат, ликвидировать отрыв, то картина бы резко изменилась. Нижний штриховой линией на фиг. 2 изображены результаты расчета полного сопротивления для модели дельфина при ламинарном обтекании, выполненного в предположении, что сопротивление отрыва равно нулю. В этом случае нет существенного расхождения между расчетом и экспериментальными данными, за исключением планов 10-3 и 18-7, результаты для которых лежат ниже расчетной кривой. Однако следует отметить, что сопротивление трения при движении с постоянным отрицательным ускорением (т. е. для режима, соответствующего описанному опыту) несколько меньше сопротивления при стационарном обтекании.



Фиг. 2



Фиг. 3

схемы объяснения, по-видимому, нужно отказаться. Итак, из рассмотренных известных схем наименьшее расхождение с экспериментом по величине сопротивления дает расчетная схема ламинарного безотрывного обтекания. В таком случае возникают две принципиально важные задачи.

1. Каким образом можно достигнуть критическое число Рейнольдса  $Re_* > 10^7$  на теле вращения в области с положительным градиентом давления при обтекании потоком с ненулевым уровнем турбулентности?

2. Как предотвратить отрыв ламинарного пограничного слоя в корме?

*Замечание.* Уже после выполнения данной работы авторы ознакомились с докладом профессора Калифорнийского технологического института Ву<sup>1</sup>, который он сделал на

<sup>1</sup> Т. Yao-tsu Wu. Fluid Technics of Swimming Propulsion. Paper, presented VII Sympos. on Naval Hydrodynamics, Rome, August 1968 25—30.

VII Симпозиуме по морской гидродинамике, состоявшемся 25—30 августа 1968 года в Риме. В докладе профессор Ву приводит экспериментальные данные по сопротивлению, полученные Лангом для дельфина рода *tursiops gilli* (тихоокеанская афалина) и делает вывод, что для этого вида дельфина, по-видимому, реализуется ламинарное обтекание. Таким образом, в двух независимо выполненных работах для очень близких видов животных получены аналогичные результаты.

Поступила 14 IV 1970

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Семенов Б. Н. О существовании гидродинамического феномена дельфина афалины. В сб. «Бионика», вып. 3, Киев, «Наукова думка», 1969.
2. Букалов В. М., Нарусбаев А. А. Проектирование атомных подводных лодок. Л., «Судостроение», 1964.
3. Войткунский Я. И., Першиц Р. Я., Титов И. А. Справочник по теории корабля. Л., Судпромгиз, 1960.
4. Алексеева Т. Е., Громов В. П., Дмитриева А. Ф., Колобов Б. П., Кузнецов Б. Г., Семенов Б. Н., Яненко Н. Н. Расчет характеристик ламинарного пограничного слоя на телах вращения. Новосибирск, «Наука», 1968.
5. Kramer M. O. The dolphin's secrete. J. Americ., Soc. Naval Engrs, 1961, vol. 73, No. 1.
6. Шлихтинг Г. Теория пограничного слоя. М., Изд-во иностр. лит., 1956.

#### ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИЗМЕРЕНИЕ АМПЛИТУДНЫХ ПОПРАВОК К СКОРОСТИ РАСПРОСТРАНЕНИЯ КАПИЛЛЯРНЫХ ВОЛН

*А. С. Горшков, В. Ф. Марченко, А. Ф. Целыковский*

(Москва)

В ряде работ, посвященных анализу установившихся капиллярно-гравитационных волн на поверхности жидкости (см., например, [1-3]), показано, что скорость распространения нелинейной волны зависит от ее амплитуды. Эта зависимость выражается поправкой к скорости распространения основной гармоники в диспергирующей среде и имеет порядок малости  $\sim (ka)^2$  ( $k$  — волновой вектор,  $a$  — амплитуда поверхностной волны). Для скорости волн на поверхности идеальной, бесконечно глубокой жидкости можно записать

$$c = c_0 [1 + \alpha (ka)^2] \quad (1)$$

где  $c_0$  — скорость волны при  $ka \rightarrow 0$ ,  $\alpha = 1/2$  для гравитационных и  $\alpha = -1/16$  для капиллярных волн. Ниже приводится методика экспериментального определения зависимости (1) для капиллярных волн.

Известно, что в средах, в которых выполнено условие (1), можно реализовать такие, хорошо изученные для электромагнитных волн явления, как пространственное и временное сжатие (или расплывание) волновых пакетов [4]. Однако использовать эти явления для проверки формулы (1) затруднительно вследствие наличия заметного затухания капиллярных волн. Нелинейный характер этого затухания приводит к тому, что при возбуждении поверхностных волн возникает движение жидкости в направлении распространения волны [5], подобно акустическому ветру в вязкой среде. Этот эффект на практике проявляется уже при значениях  $a/\lambda \sim 0.01$  и определяет изменение длины распространяющейся волны. Кроме того, примерно при этих же значениях  $a/\lambda$  возбуждение достаточно широкого пучка волн сопровождается возникновением параметрической генерации (поперечной структуры волн субгармоники вблизи волнопродуктора), искажающей картину бегущих волн.

Обойти отмеченные выше трудности позволяет система, схема которой приведена на фиг. 1. Здесь 1 — кювета с жидкостью, 2 — зонд, 3 — частотомер, 4 — звуковой