

Е. В. Романенко

## О ГИДРОДИНАМИКЕ РЫБ И ДЕЛЬФИНОВ

Излагается сущность "парадокса Грея" и гипотезы Грея, предложенных им для объяснения парадокса, сущность которого состоит в том, что некоторым рыбам и дельфинам приписывается способность двигаться под водой со скоростью, необъяснимой запасом их мускульной энергии. Приводятся результаты экспериментов, поставленных на рыбах, дельфинах и модели рыбы, подтверждающих справедливость гипотезы Грея.

Проблема гидродинамики рыб и дельфинов, сформулированная почти 40 лет назад английским зоологом Джеймсом Греем [1], является одной из самых важных и самых трудных из числа проблем, связанных с жизнедеятельностью животных. С тех пор она без существенных изменений и практически безуспешно обсуждается в мировой литературе.

Этой проблемой в Акустическом институте живо интересовался академик Николай Николаевич Андреев, справедливо считая, что рыбы и дельфины чрезвычайно интересны как объекты исследований, результаты которых могут служить, в частности, первоисточником ценных технических решений. На протяжении многих лет он успешно руководил бионическими исследованиями в институте и в том числе работами, связанными с проблемой гидродинамики рыб и дельфинов.

Сущность проблемы заключается в том, что некоторым рыбам и дельфинам приписывается необъяснимая способность двигаться со скоростями, необъяснимыми запасом их мускульной энергии.

Этот так называемый "парадокс Грея" сыграл положительную роль в науке, привлекая внимание ученых к проблеме гидродинамики животных. Для объяснения парадокса был предложен ряд гипотез. При этом авторы гипотез исходили, во-первых, из несомненного существования парадокса и, во-вторых, из необходимости ламинарного обтекания рыб и дельфинов при сверхкритических числах Рейнольдса как единственно возможном объяснении парадокса.

Но, несмотря на то, что парадокс Грея сформулирован очень давно, существование его до сих пор фактически не доказано, поскольку очень трудно правильно оценить удельную мощность мускулов животных. Таким образом, в настоящее время существуют уже две проблемы: существует ли парадокс Грея и способны ли быстроходные рыбы и дельфины охранять (сознательно или бессознательно) обтекание ламинарным или ламинаризовать турбулентный пограничный слой при сверхкритических числах Рейнольдса.

Из этих двух проблем более важной является вторая, поэтому рассмотрим некоторые особенности гидродинамики рыб и дельфинов.

Опубликовано большое количество теоретических и экспериментальных работ, в которых с различных позиций обсуждаются вопросы движения рыб и дельфинов. Однако ни в одной из них не рассматривается гипотеза, высказанная Греем в 1935 г. Вместе с тем эта гипотеза представляется одной из наиболее перспективных.

Сущность ее заключается в следующем.

Известно, что при плавании у рыб и дельфинов тяга создается с помощью колебательного движения тела, которое может быть аппроксимировано изгибной волной, бегущей от головы к хвосту с нарастающей амплитудой. При этом массы жидкости отбрасываются назад, что приводит к понижению давления в хвостовой части тела рыбы или дельфина и к созданию отрицательного градиента давления вдоль тела. Жидкость из окружающего пространства, в том числе и из областей, непосредственно примыкающих к телу, устремляется с ускорением в зону пониженного давления. Происходит своеобразное отсасывание пограничного слоя, рис. I (рисунок взят из работы Грея [1]).

По мнению Грея, такое ускорение потока жидкости вдоль тела рыбы или дельфина должно приводить к сохранению ламинарного обтекания при сверхкритических числах Рейнольдса. Гипотеза Грея объясняет два основных факта, наблюдающихся при движении как рыб, так и дельфинов.

Во-первых, способностью быстро двигаться обладают как рыбы, так и дельфины, несмотря на то, что в биологическом отношении они чрезвычайно отличны друг от друга, имеют различную структуру кожи, наружные покровы кожи также различны. Рыбы и дельфины имеют только одну общую черту — колебательный характер движения тела, являющийся, по мнению Грея, достаточным условием создания отрицательного градиента вдоль тела и, следовательно, стабилизации ламинарного обтекания.

Во-вторых, сопротивление движению мертвых рыб или дельфинов, движущихся по инерции (т.е. несовершающих колебательных движений тела), не отличается от сопротивления движению моделей соответствующей формы. Это объясняется с точки зрения гипотезы Грея тем,

что тело, не совершающее колебательного движения, не создает вдоль своей обтекаемой поверхности отрицательного градиента.

Второй факт особенно наглядно иллюстрируется результатами работы [2]. В этой работе экспериментально исследовано гидродинамическое сопротивление живого и мертвого лосося в потоке воды. Вначале измерялись затраты энергии живым лососем на то, чтобы удержаться в потоке воды заданной скорости. Затраты энергии оценивались по степени кислородного обмена и уменьшению веса рыбы за определенный промежуток времени. Затем измерялись внешние затраты механической энергии на то, чтобы удержать только что убитого (того же самого) лосося в потоке воды с той же скоростью. Оказалось, что в первом случае затраты энергии вдвое меньше, чем во втором. Условия эксперимента отличались только тем, что в первом случае рыба совершала активные колебательные движения, а во втором — она была неподвижна.



Рис.1. Схема обтекания активно плывущего дельфина

Несмотря на убедительность результатов описанного эксперимента, они могут служить лишь косвенным доказательством справедливости гипотезы Грея, так как наличия отрицательного градиента вдоль тела рыбы они не доказывают.

Для того чтобы установить наличие отрицательного градиента вдоль колеблющегося тела, был проведен следующий эксперимент, рис.2. Был изготовлен резиновый клин 1, вдоль боковой поверхности которого располагались три отверстия 2, соединяющиеся с тремя жидкостными манометрами 3. В головной части клина закреплялся стержень 4, с помощью которого клин приводился в поперечное колебательное движение. Изгибная волна, возбужденная в головной части клина, распространялась по клину от его утолщенной части к тонкой с нарастанием амплитуды, имитируя тем самым колебательный характер движения тела рыбы (или дельфина). Эксперимент проводился в неподвижной воде. При отсутствии колебаний уровни во всех трех манометрах были одинаковы. Но как только головная часть клина приводилась в колебательное движение и по клину от головы к хвосту распространялась изгибная волна, показания всех трех манометров падали, причем самое низкое давление показывал манометр, расположенный ближе всех к хвосту клина, а самое высокое — манометр, ближайший к головной части. Следует отметить, что манометры были

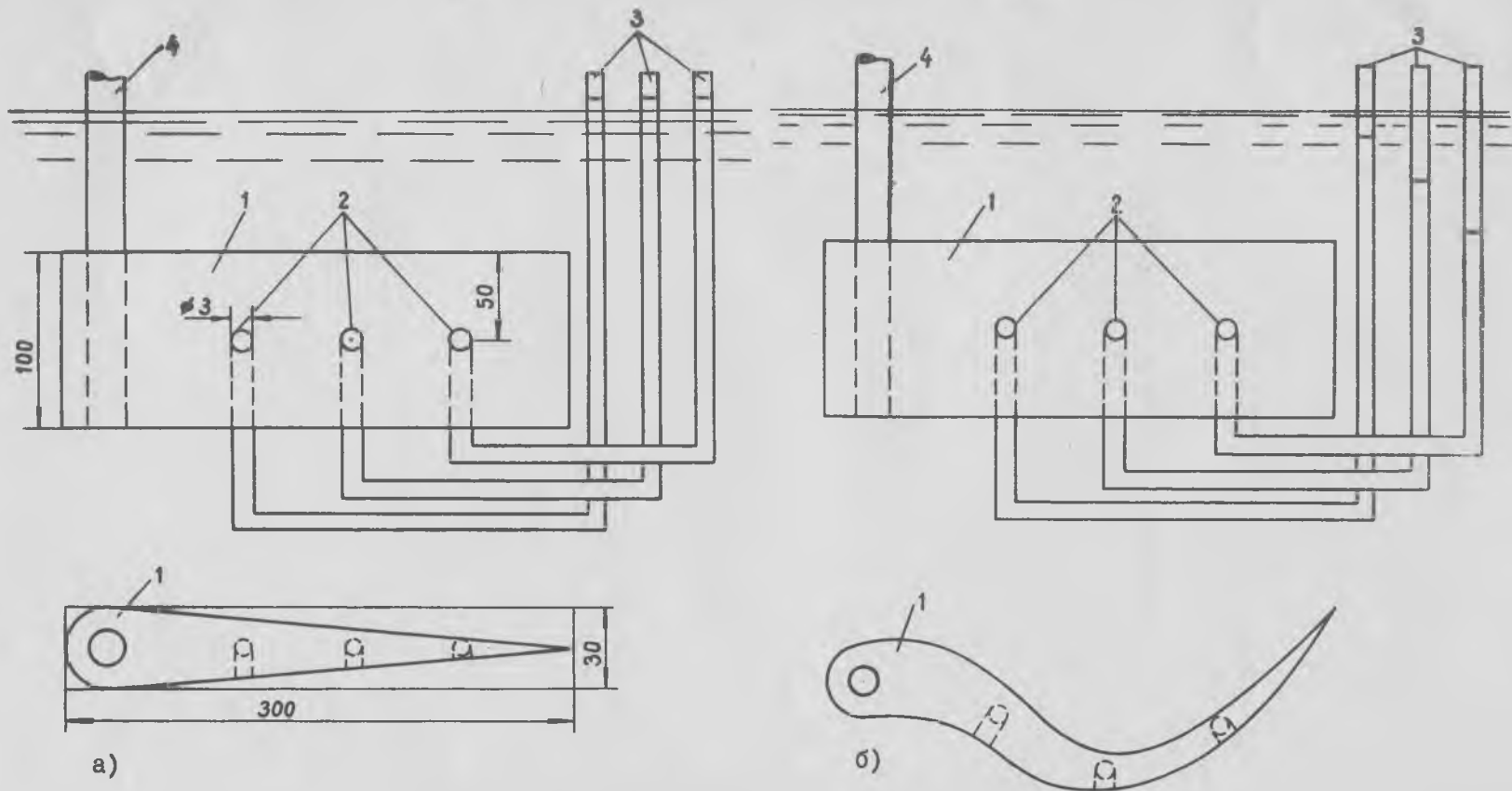


Рис.2. Схема эксперимента с резиновым клином:  
 а) в отсутствие колебаний;  
 б) при наличии изгибных колебаний:  
 1 - резиновый клин; 2 - отверстия в клине;  
 3 - манометры; 4 - стержень, возбуждающий колебания

сконструированы таким образом, чтобы иметь возможность регистрировать только постоянную составляющую давления. Величина возникшего при этом отрицательного градиента давления легко достигала порядка  $10^{-5} - 10^{-4}$  атм/см.

Результаты описанного эксперимента с клином подтвердили целесообразность проведения соответствующих измерений на живом объекте. В качестве объекта исследования был выбран дельфин-афалина. Однако измерять непосредственно градиент давления оказалось сложно, поэтому было измерено распределение скоростей обтекания одновременно в различных точках тела свободно плавающего дельфина, по которому и оценивался градиент давления. Измерения проводились с помощью измерителя скорости типа вертушки и автономной телеметрической аппаратуры, укрепляемой на дельфине.

На рис.3 представлены результаты измерений в виде зависимости от времени скорости движения дельфина и безразмерного формпараметра  $F$ , характеризующего градиент давления

$$F = \frac{\nu}{\rho U_1^3 \Delta x} = \left( \frac{\rho U_1^2}{2} - \frac{\rho U_2^2}{2} \right). \quad (I)$$

Здесь  $U_1$  - скорость обтекания тела дельфина в районе миделевого сечения;

$U_2$  - скорость обтекания в точке тела, расположенной на 50 см ниже по потоку;

$\nu$  - вязкость;

$\rho$  - плотность жидкости.

Измерители скорости располагались за пределами пограничного слоя на расстоянии 5 см от поверхности тела дельфина.

Результаты, представленные на рис.3, свидетельствуют о том, что при активном движении дельфина (движение с ускорением и с постоянной скоростью) вдоль его тела устанавливается отрицательный градиент давления. Когда дельфин движется по инерции (с замедлением), градиент давления увеличивается и даже становится положительным. Таким образом, предположение Грея о возможности существования отрицательного градиента давления вдоль тела активно движущихся рыб и дельфинов подтвердилось.

Теперь остается уточнить, действительно ли отрицательный градиент давления может благотворно влиять на характер обтекания тела животных. Что касается обтекания жестких тел, то этот вопрос сомнений не вызывает. Существуют работы, ставшие почти классическими [3], свидетельствующие о том, что отрицательный градиент давления вдоль обтекаемого тела повышает критическое число Рейнольдса. Если все же ламинарное обтекание сменилось турбулентным,

то и в этом случае отрицательный градиент давления может сыграть положительную роль: может привести к обратному переходу турбулентного обтекания в ламинарное, т.е. "ламинаризовать" турбулентный пограничный слой [4]. При этом наблюдаются явления, свидетельствующие о таком переходе: растет величина формпараметра профиля скоростей  $H_{12} = \delta_1 / \delta_2$  ( $\delta_1$  и  $\delta_2$  - соответственно толщина вытеснения и толщина потери импульса); растет толщина ламинарного подслоя; профиль скоростей в пограничном слое приближается к Блазиусовскому; уменьшается интенсивность пульсаций скорости и давления.

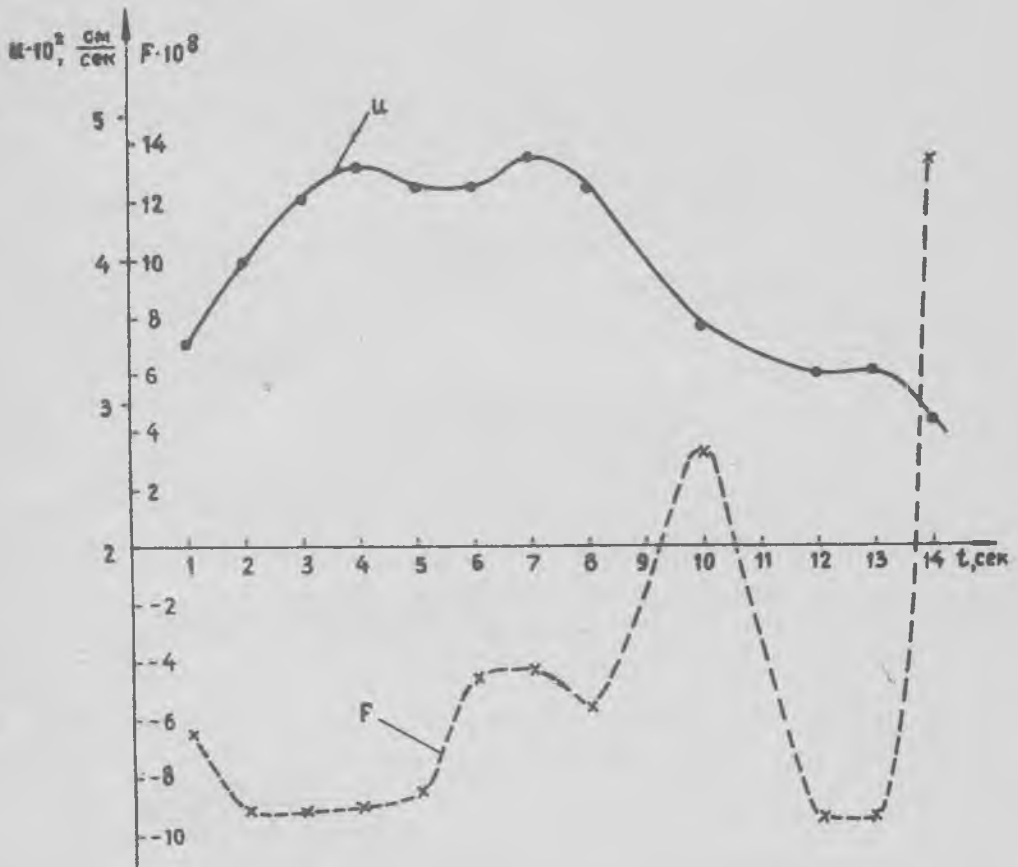


Рис.3. Зависимость скорости движения дельфина  $U$  и параметра, характеризующего градиент давления  $F$ , от времени

Обратный переход турбулентного режима течения в ламинарный наступает при значении формпараметра

$$F = \frac{\nu}{\rho U_{\infty}^3} \frac{dp}{dx} \approx 3,5 \cdot 10^{-6} . \quad (2)$$

Здесь  $u_\infty$  - скорость потока на границе пограничного слоя;  
 $\frac{dp}{dx}$  - градиент давления.

Оценка этого формпараметра по данным, представленным на рис.3, показывает, что на участках отрицательного градиента давления он достигает значения  $-0,1 \cdot 10^{-6}$ , т.е. по абсолютной величине на порядок меньше того, при котором начинается обратный переход турбулентного режима в ламинарный.

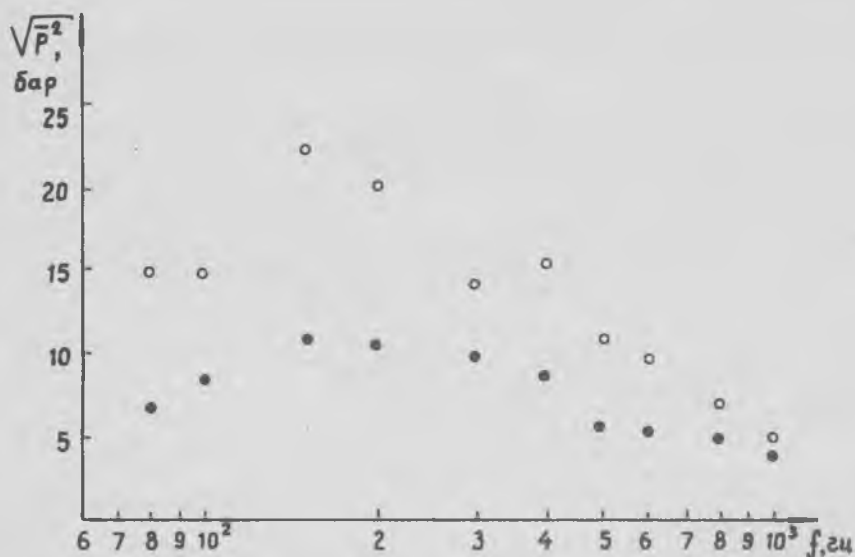


Рис.4. Спектральная плотность среднеквадратичных пульсаций давления:

- - сильно активное движение дельфина с ускорением  $3 \text{ м/сек}^2$ ;
  - - пассивное движение дельфина.
- Средняя скорость движения в обоих случаях равна  $350 \text{ см/сек}$

Однако следует иметь в виду, что вертушка позволяет измерять лишь продольную компоненту скорости обтекания в заданной точке, которая может быть значительно меньше полной скорости обтекания с учетом колебательного характера движения тела. В этом смысле результаты, представленные на рис.3, следует рассматривать как качественную иллюстрацию существования отрицательного градиента вдоль тела активно движущегося дельфина. Следовало бы измерить полную скорость обтекания в различных точках тела дельфина. Не исключено, что вычисленный в этом случае формпараметр  $F$  окажется одного порядка с тем, при котором наступает "ламинаризация".

В связи с этим представляют интерес проведенные измерения интенсивности флуктуаций давления в пограничном слое дельфина в районе миделя. В результате измерений установ-

лено, что пограничный слой в значительной степени турбулизирован.

Однако уровень пульсаций давления в пограничном слое на участках активного движения дельфина на 6-8 дБ ниже, чем на участках движения по инерции. При этом в случае движения дельфина по инерции уровень пульсаций давления соответствует развитому турбулентному режиму течения, рис.4. Результаты, представленные на рисунке, могут быть объяснены ламинаризирующим действием отрицательного градиента давления на турбулентный пограничный слой.

Изложенные в настоящей работе экспериментальные данные следует рассматривать как предварительные. Требуются более детальные исследования характера обтекания дельфина и других быстроходных морских животных, чтобы более отчетливо представить себе их гидродинамические особенности. Тем не менее, полученные данные заставляют по-новому подойти к решению проблемы обтекания рыб и дельфинов. Не исключена возможность существования также каких-либо других механизмов управления пограничным слоем рыб и дельфинов, но влияние при этом отрицательного градиента давления вдоль их тела, по-видимому, несомненно.

#### Л и т е р а т у р а

1. G r a y J. Studies of animal locomotion. The propulsive powers of the dolphin. J.Exp.Biol. 1936, 13, 192-199.
2. B r e t t J.R. The swimming energetics of salmon. Sci. american. 1965, 213, 2, 80-85.
3. Ш л и х т и н г Г. Теория пограничного слоя. М., "Наука", 1969, 462.
4. Р е п и к Е.У. Экспериментальное исследование структуры турбулентного пограничного слоя при наличии продольного градиента давления. Труды ЦАГИ. 1970, вып.1218, 19-35.

Статья поступила в июле 1971 г.