

ISSN 1605-8070



# ВЕСТНИК РФФИ

№ 3 (37) Сентябрь 2004 года

---



## ГИДРОДИНАМИКА ДЕЛЬФИНОВ

*Е.В. Романенко, доктор биологических наук,  
кандидат физико-математических наук*

*Институт проблем экологии и эволюции им. А.И. Северцева РАН*

### Раздел 1

Активное изучение гидродинамики дельфинов началось с работ английского зоолога Джеймса Грея в середине тридцатых годов [1, 2]. Он обратил внимание на несоответствие скорости плавания дельфинов и запасов их мускульной энергии. Проанализировав известные ему из литературы данные о скорости плавания дельфинов и сопоставив эти данные с энергией их мускулов, Грей пришел к выводу, что запасов энергии в несколько раз меньше, чем необходимо для обеспечения наблюдаемой скорости плавания. Этот вывод вошел в научную литературу как «Парадокс Грея». Он же высказал и гипотезу для объяснения парадокса. Грей предположил, что дельфины обладают способностью сохранять обтекание тела ламинарным при скорости плавания, когда ламинарное обтекание уже должно было бы смениться турбулентным. Он же указал возможный механизм задержки перехода ламинарного обтекания в турбулентное. Грей предположил, что на теле активно плывущего дельфина формируется благожелательный (отрицательный) градиент динамического давления, который и приводит к задержке перехода ламинарного обтекания в турбулентное. Функцию генератора отрицательного градиента динамического давления он приписывал хвостовой лопасти, отбрасывающей назад массы воды в процессе создания тяги.

С тех пор, как был сформулирован Греем его парадокс, практически все работы по изучению гидродинамики дельфинов во всем мире (экспериментальные и теоретические) были направлены на то, чтобы подтвердить или опровергнуть выводы Грея об уникальных способностях дельфинов. Свой интерес исследователи обратили также на рыб, справедливо полагая, что, поскольку механизм создания тяги у дельфинов и большинства рыб принципиально одинаков, у последних также следует ожидать интересных гидродинамических особенностей, тем более, что они более доступны для экспериментов. Основная проблема, которой занимаются ученые многих стран на протяжении более полувека, состоит в том, чтобы выяснить, обладают ли дельфины механизмами снижения гидродинамического сопротивления или нет.

Наиболее актуальные экспериментальные и теоретические задачи, стоящие на пути решения проблемы, можно сформулировать следующим образом:

- измерение скорости плавания дельфинов в контролируемых условиях;
- изучение кинематики тела и хвостовой лопасти;
- изучение тонкой структуры пограничного слоя на свободно плавающем дельфине;
- измерение распределения динамического давления на теле свободно плавающего дельфина;
- измерение касательных напряжений в пограничном слое свободно плавающего дельфина;
- создание теоретических моделей плавания дельфинов и работы хвостовой лопасти;
- оценка тяги, развиваемой дельфином, коэффициента полезного действия движителя и коэффициента сопротивления.

Прежде всего появились теоретические работы [3–9], затем экспериментальные [10–16]. Большинство работ в этот период было выполнено в США и Великобритании.

В СССР активные систематические исследования гидродинамики дельфинов начались на 10 лет позднее теоретическими [17–20] и экспериментальными [21–31] работами. Справедливости ради следует упомянуть первые экспериментальные работы по изучению кинематики дельфинов, выполненные в бывшем СССР [32, 33]. Это была первая попытка автоматической регистрации кинематических параметров свободно плавающего дельфина с помощью автономного механического регистрирующего устройства, закрепленного непосредственно на животном. Работа представляет скорее исторический интерес, чем научный.

С 1965–1966 года в США работы по гидродинамике дельфинов практически полностью прекратились. Причиной тому послужили работы [11, 15, 16], в которых на основе всего лишь измерений скорости плавания дельфинов в контролируемых условиях были сделаны выводы об ошибочности оценок Грея. Никаких

попыток экспериментально изучить характер обтекания тела дельфина и структуру его пограничного слоя предпринято не было. За три десятка лет, прошедших после выхода в свет упомянутых работ, было еще несколько публикаций в англоязычных изданиях [34–37], в которых проведена ревизия оценок Грея и подтвержден сделанный ранее вывод об отсутствии каких-либо механизмов уменьшения гидродинамического сопротивления у дельфинов. Однако анализ этих работ показал, что они содержат грубые ошибки, которые полностью обесценивают их выводы [38–47]. Более подробно об этом во второй части обзора (Проект РФФИ № 93-04-21415).

Экспериментальные исследования гидродинамики дельфинов в США возобновлены с 1983 года [48]. Сравнительно недавно [37, 49, 50] опубликованы экспериментальные исследования некоторых кинематических характеристик четырех видов дельфинов: зависимость частоты колебаний тела в процессе плавания от скорости, а также амплитуды колебаний хвоста от частоты. Аналогичные исследования проведены в бывшем СССР значительно раньше [51, 52].

В СССР исследования гидродинамики дельфинов складывались иначе, чем в других странах. Работы Грея пользовались большим доверием, и главные усилия были направлены на поиски механизмов, снижающих гидродинамическое сопротивление у дельфинов. В исследованиях активное участие наряду с биологами принимали специалисты в области гидромеханики (Козлов Л.Ф., Бабенко В.В., Романенко Е.В., Каян В.П., Семенов Б.Н., Шакало В.М. и др.). Были применены прямые методы экспериментального исследования тонкой структуры пограничного слоя и распределения динамического давления на свободно плавающем дельфине, и уже в 1971–1973 гг. были получены и опубликованы первые доказательства наличия у дельфинов механизмов управления пограничным слоем [27–29, 53]. С тех пор по настоящее время в странах бывшего СССР и в России проводились и проводятся исследования гидродинамики дельфинов. Особое внимание уделяется экспериментальному изучению характера обтекания тела дельфина и тонкой структуры его пограничного слоя [42, 47, 54, 55]. С помощью специально разработанных приборов [27, 42, 47, 54–63] измеряли пульсации давления, скорости и касательные напряжения в различных точках пограничного слоя на теле дельфина. Установлено, что среднеквадратичная величина пульсаций давления, скорости и касательные напряжения зависят от режима плавания животного. В режиме плавания с ускорением и постоянной скоростью эти величины заметно

меньше (в 2–3 раза), чем при движении по инерции. Измерение скорости обтекания тела дельфина одновременно на разных расстояниях от его носа вдоль тела показало наличие значительного отрицательного градиента динамического давления в режиме плавания с ускорением или с постоянной скоростью. При движении по инерции градиент динамического давления положительный. Аналогичные результаты были получены в экспериментах с рыбами [64]. Эти данные согласуются с данными измерений пульсаций давления, скорости и касательных напряжений. Экспериментальное изучение явления перехода ламинарного режима обтекания в турбулентный в пограничном слое свидетельствует о значительном увеличении числа Рейнольдса перехода при активном режиме движения дельфина по сравнению со случаем движения по инерции. Изложенные результаты неоспоримо свидетельствуют о наличии механизма снижения гидродинамического сопротивления у дельфинов, обусловленного наличием отрицательного градиента динамического давления. Что касается самого механизма, то он хорошо известен в технической гидромеханике. Теоретическая модель этого механизма применительно к дельфинам будет изложена дальше (Проект РФФИ № 93-04-21415).

На протяжении многих лет разрабатывается гипотеза о демпфирующих способностях кожного покрова дельфинов, предложенная Крамером [65, 66]. В соответствии с этой гипотезой предполагается, что кожа дельфина способна гасить возмущения потока в пограничном слое и тем самым задерживать переход от ламинарного течения в турбулентное. Проведены многочисленные исследования морфологических и упругих особенностей кожи дельфинов [21, 67–71, 73–81]. Разрабатываются искусственные демпфирующие покрытия [82–84]. В этом направлении наблюдается несомненный успех. Что же касается наличия предположенного механизма у дельфинов, то прямых доказательств этому нет. Более того, есть основания считать, что таким механизмом дельфины не обладают. Действительно, рассмотрим два факта.

– Способностью быстро двигаться обладают как рыбы [85, 86], 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 с нарастающей от головы к хвосту амплитудой, являющийся достаточным условием создания отрицательного градиента динамического давления вдоль тела и, следовательно, стабилизации обтекания.

– Сопротивление движению мертвых рыб и дельфинов, движущихся по инерции (т.е. не совершающих колебательных движений телом), не отличается от сопротивления движению жестких моделей соответствующей формы [52]. Если бы кожа дельфина обладала демпфирующими свойствами, она должна была бы работать при всех режимах плавания (в том числе и при движении по инерции).

Интересные данные [87, 88] получены о принципиальной возможности ламинаризирующего влияния на пограничный слой дельфина глазных выделений (так называемые «слезы»), которые воздействуют аналогично высокомолекулярным добавкам (эффект Томса). К сожалению, эти данные не проверены в экспериментах с дельфинами, не установлено наличие таких выделений в пограничном слое животного. Тем более, что к ним можно отнести замечания, изложенные в предыдущем абзаце: глазные выделения должны оказывать благотворное влияние на обтекание дельфина на всех режимах его плавания. В противном случае следует предположить способность дельфина включать и выключать механизм ламинаризации по своему усмотрению, что относится уже к крайней степени антропоморфизма.

К сожалению, обмен информацией между советскими и иностранными исследователями многие годы практически отсутствовал по причине наличия языкового барьера и секретности, а также известной доли предвзятости суждений со стороны западных ученых. В результате они практически ничего не знали об исследованиях в СССР, и к настоящему времени исследователи США и других стран отстали в изучении гидродинамики дельфинов от ученых бывшего СССР и России на 20–25 лет. Речь в данном случае идет, прежде всего, об экспериментальных исследованиях. Что же касается теоретических исследований, то их уровень в США и Великобритании весьма высок.

В предлагаемом аналитическом обзоре дан критический анализ результатов теоретических исследований механизмов плавания дельфинов, который позволил обнаружить как сильные, так и слабые места теории и наметить неисследованные вопросы. Теория тонкого тела в трехмерной постановке задачи позволила сравнительно просто получить расчетные соотношения для оценки энергетических и силовых характеристик плавания животных, причем при незначительных усложнениях оказывается возможным применить ее к случаю плавания с произвольной амплитудой. Это убедительно показано в работе [89]. Чрезвычайно плодотворной оказалась развитая Лайтхиллом и его коллегами теория «отдачи», позволившая

объяснить некоторые особенности кинематики рыб и дельфинов [4, 90–92]. Однако выяснилось, что развитая ими теория полулунного хвостового плавника недостаточно учитывает ряд важных особенностей, таких как толщина и форма сечения хвостового плавника, положение оси его вращения, его удлинение, гибкость, широкий диапазон углов наклона к траектории движения и др. Эти вопросы еще требуют прояснения.

В результате анализа теоретических моделей плавания оказалось также, что наименее изученным является вопрос о законе деформации тела активно плывущего дельфина, хотя многие исследователи в своих попытках произвести количественные оценки использовали различные его варианты, основанные на качественных наблюдениях. Более того, практически все умозрительные варианты закона деформации, применявшиеся исследователями для таких оценок, не позволяли объяснить некоторые особенности кинематики дельфинов и даже приводят к физическому противоречию в предельном случае стремления величины фазовой скорости локомоторной волны к скорости плавания животного. Противоречие, например, заключается в том, что тяга в этом случае оказывается отрицательной, а коэффициент полезного действия стремится к минус бесконечности. А ведь без знания истинного закона деформации невозможно вполне корректно применить имеющуюся теорию для оценки эффективности плавания.

Поиски путей преодоления указанных трудностей привели к необходимости предположить зависимость фазовой скорости локомоторной волны рыб и китообразных от координаты в системе координат, связанной с телом животного [93]. Попросту говоря, фазовую скорость локомоторной волны нельзя считать постоянной величиной, как считали до сих пор все исследователи. Предположение о зависимости фазовой скорости локомоторной волны от координаты подтвердилось в экспериментах с дельфинами [55, 94] и рыбами [95, 96]. Идея о зависимости фазовой скорости локомоторной волны от координаты, подтвержденная экспериментально, оказалась чрезвычайно полезной при теоретическом анализе распределения градиента динамического давления на теле активно плывущего дельфина, а также при объяснении целого ряда экспериментальных фактов. В частности, известные в литературе результаты исследования тонкой структуры пограничного слоя на теле дельфина [27], некоторые особенности формы тела китообразных (например, удлинение тела, угол схода), измерения касательных напряжений в пограничном слое, рас-

пределение скоростей обтекания в разных точках на теле животного [42, 47, 55] и другие факты могут быть объяснены только в предположении такой зависимости.

В работах [42, 47, 55] сформулирован закон деформации тела активно плывущего дельфина, учитывающий переменный (в пространстве) характер фазовой скорости локомоторной волны. Он позволил получить расчетные соотношения для оценки гидродинамических сил, развиваемых движительным комплексом дельфина, и провести соответствующие оценки. Показано, что на теле дельфина в процессе его активного движения и особенно при больших ускорениях формируется значительный отрицательный градиент динамического давления, который заметно влияет на тонкую структуру пограничного слоя, повышает критическое число Рейнольдса перехода ламинарного обтекания в турбулентное. Впервые детально изучена кинематика хвостовой лопасти [42, 47]. Установлено, что по закону, близкому к гармоническому, изменяется не угол атаки, как до сих пор предполагалось в большинстве математических моделей, а угол наклона лопасти к горизонтальной оси. Угол атаки изменяется по весьма сложному закону и имеет величину около 3 градусов.

Даны оценки тяги и коэффициента сопротивления активно плывущего дельфина, формы его тела, а также описание гидродинамики дельфинов, как она представляется в свете имеющихся на сегодняшний день научных данных [42, 47, 55].

Интересны оценки предельной скорости плавания дельфинов, учитывающие особенности их гидродинамики и энергетики. Оказалось, что полученные оценки вполне удовлетворительно согласуются с измеренными значениями максимальной скорости плавания [42, 47, 55]. Эти и другие результаты исследований будут более подробно изложены в следующем разделе, так как они выполнялись в рамках проектов, поддержанных РФФИ.

Обзор не претендует на исчерпывающую полноту представления всех теоретических моделей и экспериментальных работ. В частности, не затронут вопрос о теории пограничного слоя на деформируемых телах и скольжения китообразных на волне, о теории турбулентного пограничного слоя на демпфирующей поверхности, способной частично или полностью поглощать пульсационную энергию в слое. Все эти вопросы не имеют непосредственного отношения к гидродинамике дельфинов и достаточно полно освещены в книгах Л.Ф. Козлова [52] и С.В. Першина [97].

В бывшем СССР было три группы исследователей, изучавших фундаментальные основы гидродинамики дельфинов: в Москве, Новосибирске и Киеве. Единичные работы выполнялись в Ленинграде и Севастополе. В настоящее время в России осталась только московская группа (Е.В. Романенко, С.Г. Пушков, В.Н. Лопатин, В.Г. Янов и др.), продолжающая фундаментальные исследования гидродинамики дельфинов и регулярно публикующая результаты. В Новосибирске и С.-Петербурге ведутся главным образом прикладные работы, связанные с исследованием демпфирующих свойств искусственных покрытий и технических моделей плавниковых движителей. Экспериментальные работы с дельфинами сведены к минимуму по причине отсутствия средств и экспериментальной базы.

## Раздел 2

Известны три проекта РФФИ, в которых рассматриваются фундаментальные вопросы, связанные с гидродинамикой дельфинов (93-04-21415, 96-04-48671, 99-04-48317. Руководитель проектов Е.В. Романенко). Исследования по проектам направлены на решение следующих задач:

- изучение распределения динамического давления на теле свободно плавающего дельфина, обусловленное колебаниями тела и хвостовой лопасти;
- изучение кинематики хвостовой лопасти;
- создание теоретических моделей плавания дельфинов и работы хвостовой лопасти;
- оценка тяги, развиваемой дельфином, коэффициента полезного действия движителя и коэффициента сопротивления.

В первом проекте рассмотрена оригинальная теоретическая модель формирования динамического давления на теле активно плывущего дельфина и проанализирована общепринятая малоамплитудная теоретическая модель тяги, развиваемой хвостовой лопастью дельфина как крылом большого удлинения [38–40, 42–46].

Тело дельфина рассматривается как длинный цилиндр эллиптического или кругового сечения, совершающий изгибные колебания в одной плоскости. Расположение дельфина в принятой системе координат показано на рис. 1. В этом случае для расчета мгновенного значения динамического давления на поверхности тела можно воспользоваться известным выражением для кругового цилиндра, обтекаемого потоком в поперечном направлении [98]:

$$p - p_{\infty} = \frac{\rho v_n^2}{2} (1 - 4 \sin^2 \theta_0) + \frac{\rho \cos \theta_0}{R} \frac{d(R^2 v_n)}{dt}. \quad (1)$$

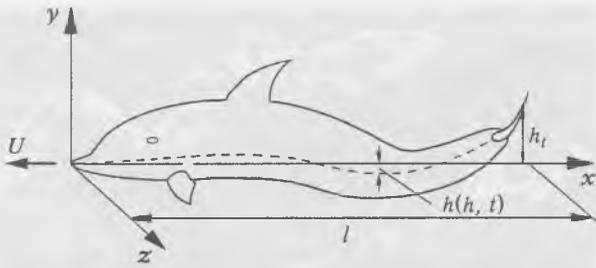


Рис. 1. Расположение дельфина в принятой системе координат

Здесь  $R$  и  $\theta_0$  – цилиндрические координаты,  $p_\infty$  – давление на бесконечности,  $t$  – время,  $v_n$  – скорость поперечного движения тела, определяемая выражением

$$v_n = \frac{\partial h}{\partial t} + U \frac{\partial h}{\partial x}, \quad (2)$$

где  $h(x, t)$  – мгновенное значение поперечных колебаний тела,  $U$  – скорость тела в направлении его продольной оси – оси  $x$ .

Усреднение по времени выражения (1) позволяет получить

$$\overline{p - p_\infty} = \frac{\rho v_n^2}{2} (1 - 4 \sin^2 \theta_0) \quad (3)$$

или в безразмерной форме

$$\frac{\overline{p - p_\infty}}{1/2 \rho U^2} = \frac{v_n^2}{U^2} (1 - 4 \sin^2 \theta_0). \quad (4)$$

В формировании пограничного слоя на обтекаемом теле определяющее значение имеет не само избыточное давление, а его градиент, мгновенное безразмерное значение которого с учетом выражений (1, 2) и (4) можно представить в виде

$$\frac{2}{\rho U^2} \frac{dp}{dx} = \frac{2}{U^2} \left\{ v_n \frac{dv_n}{dx} (1 - 4 \sin^2 \theta_0) + \frac{d}{dx} \left[ \frac{\rho \cos \theta_0}{R} \frac{d(R^2 v_n)}{dt} \right] \right\}. \quad (5)$$

Усредненное по времени значение формулы (5) имеет вид

$$\frac{2}{\rho U^2} \frac{d\overline{p}}{dx} = \frac{2}{U^2} \left( v_n \frac{dv_n}{dx} \right) (1 - 4 \sin^2 \theta_0). \quad (6)$$

Критическое число Рейнольдса однозначно связано с формпараметром профиля скоростей в пограничном слое, усредненное по времени значение которого имеет вид

$$\overline{\Lambda} = - \frac{\delta^2}{\nu U} \left( v_n \frac{dv_n}{dx} \right) (1 - 4 \sin^2 \theta_0). \quad (7)$$

Здесь  $\nu$  – кинематическая вязкость,  $\delta$  – толщина пограничного слоя.

Градиент давления оказывает влияние не только на стабилизацию ламинарного пограничного слоя, но и на тонкую структуру турбулентного. Известно, в частности, что отрицательный градиент динамического давления достаточной величины может привести даже к обратному переходу турбулентного обтекания в ламинарное [99–101] или, по крайней мере, к значительному уменьшению степени турбулентности и, следовательно, к уменьшению сопротивления трения. Влияние отрицательного градиента давления на турбулентное обтекание определяется величиной формпараметра, который имеет вид

$$\overline{B} = \frac{\nu}{U^3} \left( v_n \frac{dv_n}{dx} \right) (1 - 4 \sin^2 \theta_0). \quad (8)$$

Обратимся к формуле (3), характеризующей усредненное по времени значение избыточного давления на теле дельфина, и проанализируем зависимость давления от угла  $\theta_0$ . Эта зависимость определена множителем

$$1 - 4 \sin^2 \theta_0 \quad (9)$$

и представлена на рис. 2,а для миделевого поперечного сечения тела дельфина.

Видно, что на боковых поверхностях тела дельфина избыточное давление отрицательное, на верхней же и нижней поверхностях – положительное, причем максимальное значение отрицательного давления в три раза больше положительного.

В области тела дельфина за миделем поперечное сечение тела отличается от кругового, и чем ближе к хвостовой лопасти, тем заметнее. Точный расчет избыточного давления в этой области тела дельфина труден, но по результатам, по-видимому, мало будет отличаться от расчета для кругового сечения, так как формула (1) справедлива не только для кругового цилиндра, но и для эллиптического [98], а поперечное сечение в каудальной части тела дельфина можно аппроксимировать эллипсом. Качественно распределение динамического давления на стебле хвоста дельфина будет выглядеть так, как показано на рис. 2,б. Область положительных

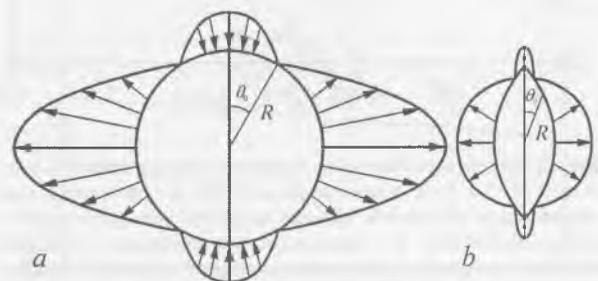


Рис. 2. Расчетное значение избыточного давления на теле дельфина в его миделевом сечении (а) и в сечении хвостового стебля (б) в зависимости от угла  $\theta_0$ ,  $R$  – радиус тела

значений уменьшится, а область отрицательных увеличится.

Оценено значение градиента динамического давления при использовании эмпирического выражения для закона деформации тела животного и экспериментальных данных о зависимости фазовой скорости локомоторной волны от координаты в системе координат, связанной с телом животного. Показано, что за один период колебания тела мгновенное значение динамического давления на его латеральной поверхности изменяется в широких пределах, достигая дважды минимального и максимального значения. Градиент давления при этом также изменяется в широких пределах, но остается все время отрицательным на большей части тела, достаточным для весьма заметного влияния на структуру пограничного слоя. Причем это влияние тем заметнее, чем ближе к хвосту рассматриваемая точка. На дорсальной и вентральной стороне тела динамическое давление и его градиент имеют знакопеременный характер и величину, по крайней мере втрое меньшую, чем на латеральной стороне. В средней части боковой поверхности тела дельфина градиент давления (рис. 3) положителен или близок к нулю.

На основании полученных результатов сделан вывод о том, что турбулизация пограничного слоя на теле дельфина должна начинаться прежде всего в средней его части, там, где градиент давления близок к нулю или имеет малую положительную величину. При этом передняя

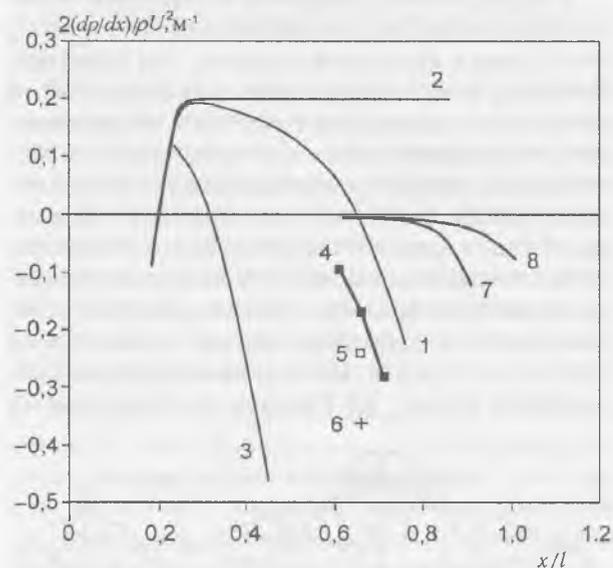


Рис. 3. Расчетные значения градиента динамического давления (1–3 и 7, 8) и измеренные (4–6). 1 – минимальные мгновенные значения в режиме плавания дельфина с постоянной скоростью, 2 – максимальные значения, 3 – минимальные мгновенные значения в режиме плавания дельфина с ускорением ( $2,6 \text{ м/с}^2$ ), 4 – движение с постоянной скоростью  $4 \text{ м/с}$ , 5 и 6 – движение с ускорением  $0,14 \text{ м/с}^2$  и  $0,4 \text{ м/с}^2$ , 7 и 8 – расчетные значения градиента, обусловленные колебаниями хвостовой лопасти



Рис. 4. Дельфины в фосфоресцирующей воде [102]

и задняя части тела дельфина могут быть обтекаемы ламинарным или заметно ламинаризованным потоком. Этот вывод подтверждается наблюдениями американских ученых за плаванием дельфинов в фосфоресцирующей воде (рис. 4).

По их наблюдениям турбулентный характер обтекания действительно отчетливо проявляется именно в средней части тела животного, головная же и хвостовая части тела дельфина обтекаются значительно ламинаризованным потоком.

Приведенные теоретические выводы хорошо согласуются с полученными ранее экспериментальными данными по тонкой структуре пограничного слоя, распределению касательных напряжений и градиента динамического давления на теле активно плывущего дельфина (рис. 3). Кроме того, они хорошо объясняют особенности формы тела дельфина. Дело в том, что угол схода тела дельфина больше критическим, и поэтому его тело не является оптимальным в смысле минимизации сопротивления при ламинарном обтекании. Здесь имеется в виду в первую очередь опасность отрыва ламинарного пограничного слоя. Форма тела китообразных вообще приближается к оптимальной с точки зрения минимизации сопротивления при турбулентном обтекании [42, 47, 55]. Безотрывный характер при ламинарном обтекании обеспечивается наличием на теле животного отрицательного градиента динамического давления, теоретическая модель формирования которого изложена выше. Таким образом, можно считать, что с учетом наличия отрицательного градиента динамического давления на теле дельфина (и, очевидно, других китообразных) форму их тела можно считать оптимальной как для ламинарного, так и для турбулентного обтекания. Это одно из наиболее важных адаптивных приспособлений, созданных природой. Необходимо отметить, что механизм формирования на теле дельфина отрицательного градиента динамического давления оказался совсем не таким, каким его предсказал Грей [2]. Он считал, что градиент давления об-

разуется за счет колебаний хвостовой лопасти дельфина. Анализ явления показал, что роль хвостовой лопасти в формировании отрицательного градиента динамического давления очень мала и проявляется лишь в непосредственной окрестности самой лопасти (см. кривые 7 и 8 на рис. 3). Главную же роль в этом явлении играют колебания собственно тела дельфина. Если бы у дельфина вообще отсутствовала хвостовая лопасть, но тело совершало бы колебательные движения, вдоль него все равно формировался бы градиент динамического давления. Именно этим обстоятельством можно объяснить известные факты дальних миграций китов, практически лишенных хвостовой лопасти в результате схваток с морскими хищниками.

В процессе решения задачи о механизме создания тяговых усилий хвостовой лопастью дельфина в рамках проекта РФФИ (93-04-21415) проведена ревизия [38–40] некоторых зарубежных исследований, имевших целью оценку тяги, тяговой мощности, коэффициента полезного действия хвостовой лопасти дельфина как движителя и коэффициента сопротивления его тела [3, 34–37]. В работе [3] выведена формула для оценки силы тяги, развиваемой хвостовой лопастью дельфина. За основу взято хорошо известное выражение для усредненной по времени тяги, вполне корректное для случая малоамплитудных колебаний крыла большого удлинения [103]:

$$\bar{E} = \frac{1}{2} \rho A_f U^2 \left( C'_\alpha \alpha_1 \pi a v - \frac{1}{2} C'^2_\alpha \alpha_1^2 \frac{1}{\pi \Lambda} - C_{\text{оп}} \right). \quad (10)$$

Здесь  $E$  – сила тяги;  $\rho$  – плотность воды;  $A_f$  – смоченная площадь двух сторон лопасти дельфина;  $U$  – скорость плавания дельфина;  $C_\alpha = 2\pi\Lambda/(2 + \Lambda)$ ;  $\alpha_1$  – максимальное значение угла атаки;  $a$  – амплитуда колебаний лопасти, представленная через ее полуширину ( $s$ );  $v = ns/U$ ;  $\Lambda$  – удлинение;  $C_{\text{оп}} = 0,023$ ;  $n$  – частота колебаний тела.

Однако автор упомянутой работы решил упростить формулу (10) путем включения некоторых кинематических параметров дельфина, которые он считал известными, в численные коэффициенты. Это привело к тому, что полученная им формула оказалась ошибочной и давала оценки тяги, более чем на порядок превышающие реальные значения. Причина в том, что в 1949 году многие кинематические параметры хвостовой лопасти дельфина были недостаточно хорошо изучены. Например, угол атаки Parry принял равным 10 градусам, тогда как по последним данным он составляет всего около 3,3 градуса. Амплитуду колебаний хвостовой лопасти и ее смоченную поверхность Parry завысил в 2 раза. Есть еще ряд мелких неточнос-

тей. В итоге оценки коэффициента сопротивления дельфины, выполненные Parry, оказались более чем на порядок выше значений коэффициента сопротивления, характерных для полностью турбулентного обтекания. На основании проведенных оценок были сделаны выводы о значительном запасе мускульной энергии у дельфинов и об отсутствии у них каких-либо механизмов снижения гидродинамического сопротивления. Webb [34] проводил аналогичные оценки по формуле, предложенной Parry, и пришел к тем же выводам, что и Parry. Кроме того, Webb [34], Yates [35] и Fish [37] провели оценки силы тяги дельфина на основе двумерной нестационарной теории крыла [4, 90, 91]. Для оценок параметра флюгирования они воспользовались формулой, предложенной в работе [104]

$$\theta = \frac{U\alpha}{\omega b}. \quad (11)$$

Здесь  $\theta$  – параметр флюгирования;  $U$  – скорость плавания дельфина;  $\alpha$  – угол наклона лопасти к горизонтальной оси;  $\omega = 2\pi f$ ,  $f$  и  $b$  – частота и амплитуда колебаний хвоста соответственно. Однако Webb и Fish вместо угла наклона лопасти  $\alpha$  использовали угол атаки, который, по крайней мере, на порядок меньше угла наклона лопасти. И все вместе упомянутые авторы использовали в своих оценках формулу (11), которая пригодна лишь в случае малоамплитудных колебаний крыла (хвоста дельфина). Для колебаний крыла с большой амплитудой Chopra и Kambe [91] уточнили формулу (11) и предложили ее в виде

$$\theta = \frac{U \operatorname{tg} \alpha}{\omega b}. \quad (12)$$

В итоге Webb и Fish получили оценки, завышенные почти на порядок, а Yates – приблизительно в три раза.

В работе [37] приведены сводные данные ряда авторов, преимущественно упомянутых выше, по оценке коэффициента сопротивления дельфинов. Эти данные показаны на рис. 5.

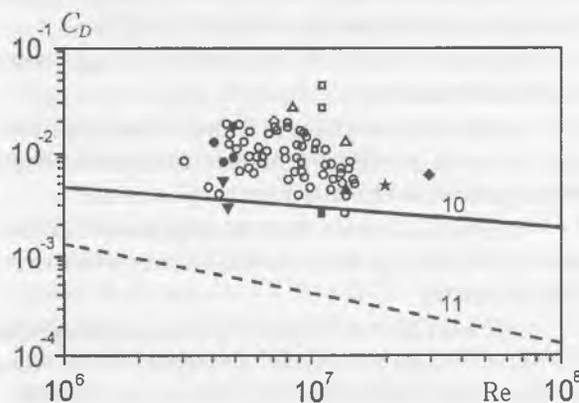


Рис. 5. Сводные данные ряда авторов по оценке коэффициента сопротивления дельфинов (по Fish [37])

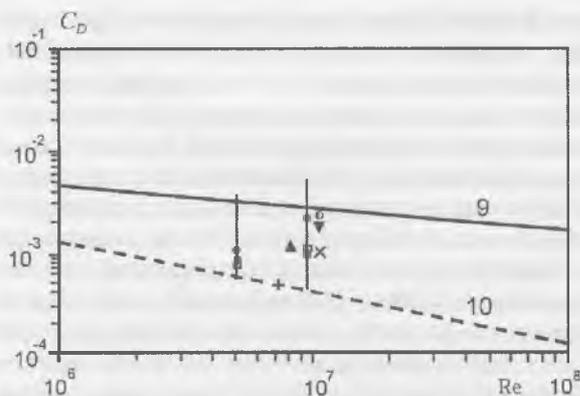


Рис. 6. Результаты оценки коэффициента сопротивления трения дельфинов после устранения ошибок в работах упомянутых выше авторов (с привлечением собственных данных)

После устранения отмеченных ошибок были вновь оценены значения коэффициента сопротивления трения дельфинов по усредненным данным тех же упомянутых выше авторов (и с привлечением собственных данных). Результаты представлены на рис. 6.

Видно, что оцененные значения коэффициента сопротивления трения дельфинов располагаются между линиями, соответствующими ламинарному и турбулентному режимам течения. Доверительные интервалы соответствуют одной среднеквадратичной погрешности.

В проекте РФФИ № 93-04-21415 приведены результаты анализа данных о коэффициенте полезного действия движителя дельфина. Информацию на этот счет могут дать графики из работы [91], на которых, к сожалению, отсутствуют кривые для значения параметра флюгирования, равного 0,9. Тем не менее можно сказать, что коэффициент полезного действия составляет величину около 97%. По данным работы [105] коэффициент полезного действия близок к 90%. Однако в этой работе оценки сделаны для крыла, имеющего угол атаки 10 градусов, тогда как угол атаки хвостовой лопасти дельфина в 3 раза меньше. Это значит, что коэффициент полезного действия, безусловно, больше 90%. Вероятно, он заключен между 90 и 97%.

В проекте РФФИ № 96-04-48671 сформулированы 3 задачи:

- детальное изучение кинематики хвостовой лопасти дельфина на основе собственных экспериментальных данных;
- оценка положения оси вращения хвостового плавника дельфина по экспериментальным данным;
- математическое моделирование движения плоского крыла конечного размаха с большими амплитудами линейных и угловых колебаний.

Кинематику хвостовой лопасти дельфина исследователи разных стран изучают кинема-

тографическим методом уже 40 лет [14, 37, 106]. При этом лопасть в процессе анализа кинограмм аппроксимируют плоским жестким гидродинамическим крылом. Пример такой аппроксимации показан на рис. 7, взятом из работы [37].

Однако тщательный анализ кинограмм, полученных исполнителями проекта в экспериментах с дельфинами [108, 123–125. Проект № 96-04-48671], показывает, что в процессе активного плавания дельфина его хвостовая лопасть значительно деформируется, особенно в верхнем и нижнем положениях.

Заметнее всего она изгибается в том месте, где оканчиваются хвостовые позвонки. При движении лопасти вверх и вниз деформации меньше, но все же вполне заметны.

В работах [14, 37, 106] совершенно не оговаривается способ аппроксимации, из которого было бы ясно, как искривленную лопасть дельфина заменяют плоским крылом. Очевидно, что крыло заменяли хордой, стягивающей начало и конец лопасти. По-видимому, по этой причине опубликованные в литературе данные измерений наклона лопасти дельфина к горизонтальной оси и угла атаки имеют значительный разброс (таблица).

Вид	Угол наклона лопасти, град.	Угол атаки, град.	Скорость плавания, м/с	Автор
<i>Tursiops truncatus</i>	30–40	4–6	2,3	[106]
Тот же	23–27	2,8–4	2,35	[122]
Тот же		19,5	2,0	[37]
Тот же		12,0	6,0	[37]
<i>Sotalia guianensis</i>	6–32	6–13	2,4	[122]
<i>Lagenorhynchus obliquidens</i>	38		5,1	[35]
Тот же		16	5,1	[34]

В проекте РФФИ № 96-04-48671 лопасть дельфина аппроксимировали аэродинамичес-

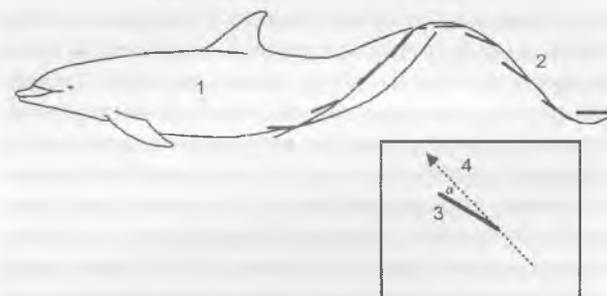


Рис. 7. Аппроксимация хвостовой лопасти дельфина плоским жестким крылом (по Fish [37])

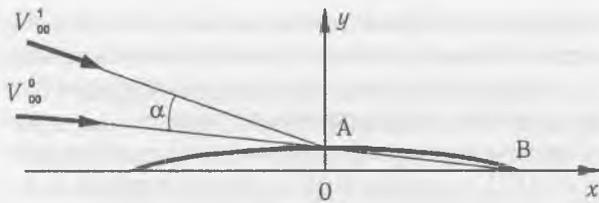


Рис. 8. Двумерное крыло в форме дужки

ким крылом, имеющим профиль в форме дужки [42, 47] (рис. 8).

Направление нулевого угла атаки, обозначенное как  $V_{\infty}^0$ , у такого крыла совпадает с линией, проходящей через точки *A* и *B* [107]. На том же рисунке показан вектор потока  $V_{\infty}^1$ , направленного под углом атаки  $\alpha$  к дужке. Можно предположить, что обтекание дугообразной хвостовой лопасти дельфина в первом приближении будет таким же, как у представленной на рис. 8 дужки. Очевидно, можно принять за угол наклона лопасти угол наклона линии нулевого угла атаки.

При оценке кинематических параметров хвостовой лопасти в рамках проекта № 96-04-48671 проводили покадровый анализ очень большого количества фотоизображений лопасти дельфина, плавающего в сетчатом вольере [123, 125]. При этом каждую лопасть (точнее, ее изображение в профиль) заменяли линией, повторяющей с возможно большей точностью ее кривизну. Далее изображения нескольких последовательных кадров совмещали с временным сдвигом, определяемым частотой киносъемки.

Обычно длительность фрагментов, выбиравшихся для анализа, не превышала 0,5–0,8 с. В результате получали покадровую последовательность положений хвостовой лопасти. Пример такой последовательности показан на рис. 9.

Лопасть двигалась сверху вниз. Видно, что кривизна лопасти меняется в широких пределах. На кадре 1 лопасть почти прямая. Этот момент соответствует положению лопасти сразу же после перекладки в верхней части ее траектории. На кадре 11 изображено начало перекладки лопасти в нижней части, с чем и связана

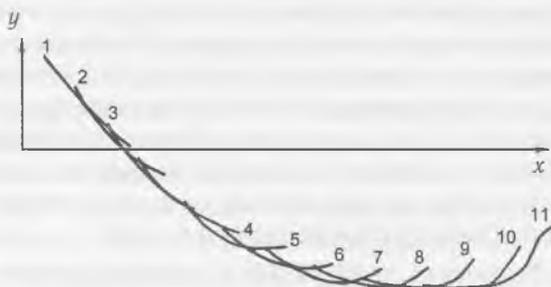


Рис. 9. Пример покадровой последовательности положений хвостовой лопасти дельфина (длительность фрагмента киносъемки около 0,3 секунды)

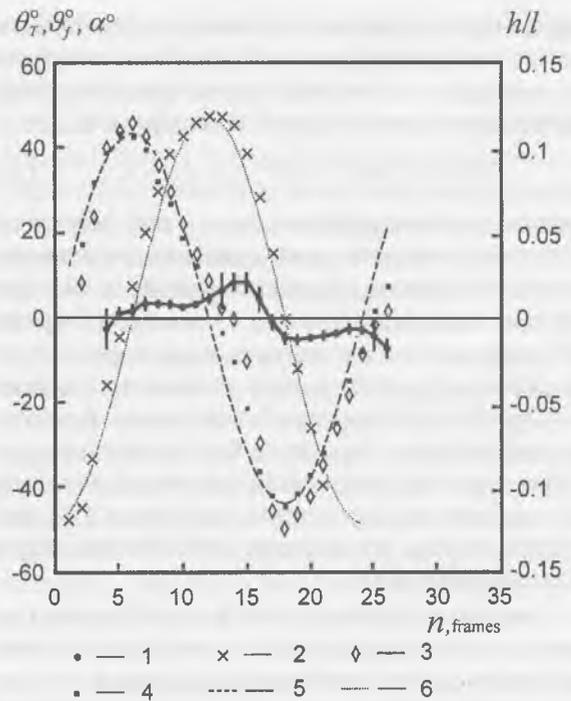


Рис. 10. Сводные данные по кинематическим параметрам хвостовой лопасти дельфина *Tursiops truncatus*, определенные экспериментально, (1–4) и гармонические функции, приведенные для сравнения, (5, 6); 1 – угол атаки ( $\alpha$ ), 2 – амплитудная функция ( $h/l$ ), 3 – функция угла наклона траектории лопасти к горизонтальной оси ( $\theta_r$ ), 4 – функция угла наклона лопасти ( $\theta_f$ ). По горизонтальной оси отложены номера кадров.

ее весьма сложная форма. Используя покадровые последовательности, подобные изображенной на рис. 9, измеряли углы наклона траектории движения лопасти, углы наклона лопасти к горизонтальной оси и углы атаки лопасти. Результаты измерений представлены на рис. 10.

Видно, что лучше всего гармонической функции соответствует функция изменения амплитуды колебаний лопасти (2). Функция угла наклона траектории лопасти достоверно отходит от гармонической функции (3). Это происходит в моменты перекладки лопасти в верхней и нижней точках траектории. Функция угла наклона лопасти (4) лучше соответствует гармонической, чем функция угла наклона траектории (3). Функция угла атаки (1) сильно отличается от гармонической. Угол атаки по величине значительно меньше (около 3 градусов), чем считалось до сих пор (см. таблицу).

В рамках проекта № 96-04-48671 по оригинальным экспериментальным данным [124] оценено положение оси вращения хвостовой лопасти дельфина в процессе его активного плавания. Для этого были измерены амплитуды смещения передней и задней кромок лопасти. Оказалось, что отношение амплитуд задней и передней кромок лопасти варьирует в пределах от 1 до 1,1. Дальнейшие расчеты основаны на

применении закона, предложенного [90] для описания движения колеблющегося двумерного жесткого крыла, имитирующего хвостовой полулунный плавник рыб и дельфинов:

$$y = [b - i\vartheta(x-b)]e^{i\omega t} \quad (-c \leq x \leq +c). \quad (13)$$

Здесь  $x$  и  $y$  – координаты,  $b$  и  $\vartheta$  – амплитуды линейного и углового движения соответственно,  $b$  – расстояние от начала координат до оси вращения,  $i$  – мнимая единица,  $c$  – полухорда крыла,  $e^{i\omega t}$  – временной множитель, характеризующий гармонический характер движения лопасти,  $\omega = 2\pi f$ ,  $f$  – частота колебаний крыла. В результате несложных расчетов было получено, что ось вращения крыла расположена от передней его кромки на расстоянии от 0,88 до 1,31 длины его хорды, что хорошо согласуется с предположением [90].

В проекте № 96-04-48671 также решена задача о колебаниях тонкого прямоугольного жесткого крыла конечного размаха в неограниченном объеме жидкости с произвольными линейными и угловыми амплитудами [108]. Схема, поясняющая постановку задачи, показана на рис. 11.

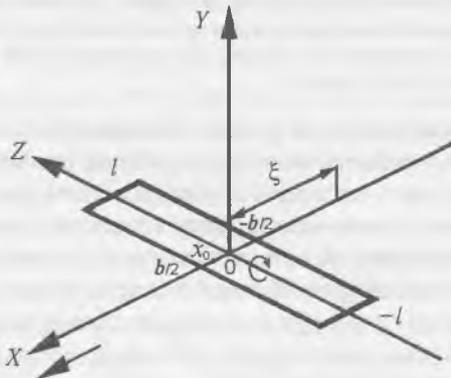


Рис. 11. Схема, поясняющая постановку задачи

Форма крыла в плане симметрична относительно оси  $OZ$  в системе координат  $OXYZ$ , движущейся с постоянной скоростью  $U_0$  в направлении  $OX$ . Движение крыла задается периодическим законом колебаний  $y = y(t)$  и  $\vartheta = \vartheta(t)$ .  $\vartheta$  – угол наклона крыла к плоскости  $OXY$  – угол тангажа. Допускается, что при больших амплитудах поперечных и угловых колебаний мгновенные значения угла атаки являются малыми величинами и характер обтекания крыла является безотрывным. Тогда, исходя из физических закономерностей, для составляющих гидродинамических сил будут справедливы следующие соотношения [109, 110]:

$$Y = -m \cdot \frac{dv_n}{dt} - \rho U_0 \int_{-l}^l \Gamma(z) dz; \quad (14)$$

$$X = m \cdot v_n \omega_z + \rho v_n \int_{-l}^l \Gamma(z) dz - X_i. \quad (15)$$

Здесь  $Y$  – подъемная сила крыла,  $X$  – подсосывающая сила,  $m^*$  – присоединенная масса крыла,  $U$  – абсолютная скорость движения крыла (относительно неподвижной жидкости),  $v_n$  – нормальная к плоскости крыла составляющая скорости  $U$ ,  $\Gamma$  – циркуляция в сечении крыла  $Z$ ,  $\rho$  – плотность жидкости,  $\omega = d\vartheta/dt$ ,  $X_i$  – индуктивное сопротивление крыла. В линейном приближении для подъемной силы справедливо выражение

$$Y = \frac{\rho U^2}{2} S \left( -C_y^\alpha \frac{v_n}{U} - C_y^{\dot{\alpha}} \frac{v_n b}{U^2} + C_y^{\omega_z} \frac{\omega_z}{U} + C_y^{\dot{\omega}_z} \frac{\dot{\omega}_z b^2}{U^2} \right). \quad (16)$$

Здесь  $S$  – площадь одной стороны крыла,  $C_y^\alpha$ ,  $C_y^{\dot{\alpha}}$ ,  $C_y^{\omega_z}$ ,  $C_y^{\dot{\omega}_z}$  – коэффициенты гидродинамических производных [111], которые считаются постоянными в течение периода колебаний, зависящими от числа Струхала,  $\alpha$  – мгновенный угол атаки крыла.

Проекция составляющих гидродинамических сил на ось  $OX$  (мгновенное значение тяги) будет

$$T = X \cos \vartheta - Y \sin \vartheta - \frac{\rho S U^2}{2} C_p \cos \vartheta. \quad (17)$$

Здесь  $C_p$  – коэффициент профильного сопротивления крыла [112].

Среднее за период колебания крыла значение тяги будет иметь вид

$$\bar{T} = \frac{\rho S}{2} (C_y^\alpha \overline{v_n V_y} - C_y^{\dot{\omega}_z} b^2 \overline{\dot{\omega}_z \sin \vartheta}) - \frac{\rho \pi S}{4} \overline{v_n^2 \cos \vartheta} - \frac{\rho S}{2} C_p \overline{U^2 \cos \vartheta}. \quad (18)$$

Здесь  $V_y = dy/dx$ ,  $\theta = \alpha + \vartheta$  – угол наклона траектории движения крыла.

Аналогично можно получить среднее значение подсосывающей силы (без учета индуктивного сопротивления), составляющей часть общей тяги:

$$\bar{X}_x = \frac{\rho S}{2} (C_y^\alpha \overline{v_n^2 \cos \vartheta} - C_y^{\dot{\omega}_z} b^2 \overline{\dot{\omega}_z \alpha \cos \vartheta}) \quad (19)$$

Задавшись конкретным законом движения крыла, нетрудно получить расчетные формулы. Такие формулы получены и проведены оценки гидродинамических сил, развиваемых крылом в малоамплитудном приближении [42]. Результаты оценок хорошо согласуются с известными данными [113]. Проведены оценки сил, развиваемых хвостовой лопастью дельфина с использованием собственных, экспериментально измеренных кинематических данных.

В проекте № 99-04-48317 решены следующие задачи:

– проведена оценка тянущей и подсосывающей сил, развиваемых собственно телом дель-

фина, на основе соотношений, полученных в рамках малоамплитудной теории тонкого тела;

- разработана математическая модель формирования градиента динамического давления колеблющейся хвостовой лопастью дельфина;
- разработана математическая модель ускоренного движения дельфина из состояния покоя до достижения им максимальной скорости плавания с учетом полученных оценок тяги и коэффициента сопротивления.

В процессе активного плавания рыб и дельфинов тяга создается за счет локомоторной волны, распространяющейся по телу животного от головы к хвосту. При этом на основании выводов теории тонкого тела для образования тяги наиболее существенны условия движения хвостового плавника. Однако это справедливо лишь в том случае, если тело обтекается потенциальным потоком. Имеющиеся экспериментальные данные и наблюдения [55] свидетельствуют о том, что пограничный слой на теле дельфина в значительной степени турбулизирован. Иногда также наблюдается срыв вихрей со спинного плавника, грудных плавников и некоторых частей тела за миделем [102]. В этом случае изменяются условия обтекания тела и, как следствие, механизм формирования тяговых усилий. Тяга может формироваться не только хвостовой лопастью, но и собственно телом животного. Это обстоятельство необходимо иметь в виду при оценке эффективности движителей рыб и дельфинов.

Рассмотрена модель плавания с образованием вихревой пелены в пределах участка тела дельфина от максимального сечения до хвостовой области (области минимального сечения) [126]. Эту задачу решал Ву [6]. Полученное им выражение для тяги имеет вид

$$\bar{T} = \frac{1}{2} m(t) \left[ \left( \frac{\partial b}{\partial t} \right)^2 - U^2 \left( \frac{\partial b}{\partial x} \right)^2 \right]_{x=1} - \frac{1}{2} \int_0^1 \left[ \left( \frac{\partial b}{\partial t} \right)^2 - U^2 \left( \frac{\partial b}{\partial x} \right)^2 \right] \frac{\partial m(x)}{\partial x} dx. \quad (20)$$

Первый член совпадает с выражением, полученным [4] для потенциального обтекания, и определяет тягу, производимую хвостовой лопастью. Второй обусловлен вихреобразованием на участке тела  $0 < x < 1$ . Можно видеть, что при вихреобразовании появляется дополнительная сила, определяемая вторым членом выражения (20). Знак этой силы зависит от соотношения членов в подинтегральном выражении.

В настоящее время в литературе имеется вполне достаточно данных по кинематике плавания дельфинов [37, 55, 114–116], чтобы провести численные оценки сил, развиваемых

хвостовой лопастью и собственно телом, чего нельзя сказать об исследованиях на рыбах. На основе выражения (20) были составлены расчетные соотношения в дифференциальной форме. Оценки с использованием экспериментально измеренных кинематических параметров показали, что доля тяги, развиваемая собственно телом дельфина, составляет около 25% при скорости плавания 4,3 м/с и около 10% при скорости 2,2 м/с.

Как уже упоминалось выше, английский зоолог Дж. Грей [2] предположил, что на теле активно плывущего дельфина формируется благожелательный (отрицательный) градиент динамического давления, который и приводит к задержке перехода ламинарного обтекания в турбулентное. Функцию генератора отрицательного градиента динамического давления он приписывал хвостовой лопасти, отбрасывающей назад массы воды в процессе создания тяги. В рамках проекта № 93-04-21415 было показано, что существует иной механизм формирования отрицательного градиента динамического давления достаточной величины, обусловленный колебательными движениями тела дельфина с амплитудой, нарастающей от головы к хвосту [38]. Тем не менее гипотеза Грея о роли хвостовой лопасти безусловно заслуживает внимания. В рамках проекта № 99-04-48317 разработана математическая модель формирования отрицательного градиента динамического давления колеблющейся хвостовой лопастью дельфина. Возможны два независимых механизма: первый связан с влиянием вихревой пелены, стекающей с кромки хвоста, на характер обтекания тела, и второй, обусловленный дополнительным полем скоростей, индуцируемых колеблющейся лопастью как диполем [117].

Для оценки вызванных скоростей и давлений, индуцированных вихревой пеленой, рассмотрено движение плоского крыла конечного размаха (плавника) в системе координат  $OXYZ$ , движущейся со скоростью  $U$  в направлении оси  $OX$ , равной скорости передвижения дельфина (рис. 12).

Пусть в системе координат  $OXYZ$  на поперечное колебание крыла  $y = b \sin \omega t$  накладываются угловые  $\vartheta = \vartheta_1 \cos \omega t$ , где  $\vartheta$  – угол, составляемый плоскостью крыла с плоскостью  $OXZ$ . Схематично крыло представлено в виде несущей линии  $AB$ . При движении вихревая пелена за крылом сворачивается в вихревые жгуты и в следе формирует дорожку в виде вихревых рамок. В первом приближении допускается, что каждая из рамок представляет собой прямоугольник.

Здесь  $C_{f1} = \frac{1,328}{\sqrt{Re}}$  и  $C_f = 0,00103$  – коэффициенты сопротивления трения при ламинарном обтекании и формы тела соответственно [42, 119],

$$Re = \frac{Ul}{\nu}, \nu - \text{кинематическая вязкость, } l - \text{длина}$$

тела животного,  $\rho$  – плотность воды,  $S_b$  – площадь смоченной поверхности животного, составляющая около  $1,5 \text{ м}^2$  для дельфина массой 80 кг. В формуле (32) не учитывается коэффициент профильного и индуктивного сопротивления хвостовой лопасти, так как потери мощности на их преодоление уже учтены в предположении равенства тяги и веса дельфина. Действительно, когда дельфин «стоит на хвосте», хвостовая лопасть активно работает, и часть тяги идет на преодоление ее профильного и индуктивного сопротивления. Оставшаяся же часть генерируемой лопастью тяги поддерживает тело в «стоячем» положении. Из выражения (32) получим

$$\frac{dU}{dt} = \frac{k_2}{k_1} g - 0,009U\sqrt{U} - 0,01U^2. \quad (33)$$

При достижении дельфином некоторой скорости развиваемая им мощность достигнет предельной, равной 3000 Вт. Это произойдет при скорости  $U = 3,06 \text{ м/с}$ , значение которой можно получить из соотношения  $T_{\max}U = P_{\max} = 3000 \text{ Вт}$ ,  $T_{\max} = k_2mg$ ,  $g$  – ускорение силы тяжести. После достижения дельфином указанной скорости и до момента времени в 1с уравнение движения животного можно представить в виде

$$\frac{dU}{dt} = \frac{k_2}{k_1} g \left( \frac{3,06}{U} \right) - 0,009U\sqrt{U} - 0,01U^2. \quad (34)$$

Выражение в скобках в правой части учитывает предположение о постоянстве мощности, развиваемой дельфином до истечения первой секунды от начала движения. По истечении первой секунды движения дельфина развиваемая им мощность должна уменьшаться по закону  $t^{-1/3}$ . Это обстоятельство можно учесть соответствующим множителем в правой части формулы (34) в первом ее члене. Тогда

$$\frac{dU}{dt} = \frac{k_2}{k_1} g \left( \frac{3,06}{Ut^{1/3}} \right) - 0,009U\sqrt{U} - 0,01U^2. \quad (35)$$

Уравнение движения дельфина, представленное соотношением (35), выполняется до того момента времени, когда наступает турбулизация пограничного слоя и резко возрастает сила сопротивления. С этого момента рост скорости существенно замедляется. Можно считать, что максимального значения скорости дельфин достигает к моменту турбулизации пограничного слоя. Авторы работы [120] специально изучали плавание дельфина с предель-

ной скоростью в условиях неволи и пришли к выводу, что максимальное значение скорости достигается дельфином через 2с от начала движения, после чего скорость заметно уменьшается. Логично предположить, что именно в этот момент наступила турбулизация пограничного слоя и сила сопротивления движению дельфина стала определяться соотношением [119]:

$$C_f = \frac{0,455}{(\lg Re)^{2,58}} - \frac{A}{Re}. \quad (36)$$

Здесь  $A = 1700$ . Тогда уравнение движения дельфина после турбулизации (после  $t = 2 \text{ с}$ ) будет иметь вид

$$\frac{dU}{dt} = \frac{k_2}{k_1} g \left( \frac{3,06}{Ut^{1/3}} \right) - K \left[ \frac{4,046U^2}{(6,3 + \lg U)^{2,58}} - 0,0075U \right] - 0,01U^2. \quad (37)$$

Здесь коэффициент  $K$  перед вторым членом в правой части учитывает тот факт, что при активном плавании дельфина после турбулизации пограничного слоя коэффициент турбулентного сопротивления по крайней мере в 2 раза меньше, чем на жестком теле дельфиноподобной формы. Как было показано выше, это обстоятельство объясняется наличием значительного отрицательного градиента давления на теле активно плывущего дельфина и подтверждается прямыми измерениями касательных напряжений в пограничном слое.

На рис. 13 приведена расчетная зависимость скорости движения дельфина от времени, полученные в результате численного интегрирования уравнений движения (30), (33), (35) и (37) по методу Рунге–Кутты [121].

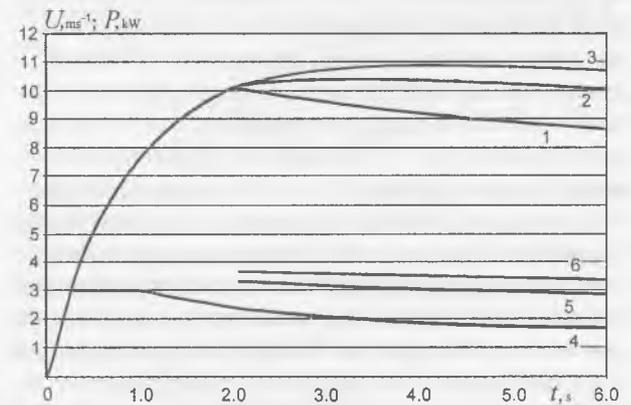


Рис. 13. Расчетная зависимость скорости дельфина от времени в процессе его движения из состояния покоя. Кривые 1, 2, 3 получены при значениях  $K = 1, 1/2$  и  $1/3$  соответственно. 5, 6 – мощность, которую должен был бы развивать дельфин, чтобы достигнуть того же значения скорости, которое характеризуется кривыми 2, 3, если бы обтекание дельфина было таким же, как у жесткого дельфиноподобного тела; 4 – реальная мощность дельфина

Параметры дельфина приняты следующими: масса 80 кг, максимальная развиваемая мощность 3000 Вт, максимальная развиваемая тяга в первый момент движения равна весу тела.

Известны экспериментальные данные [120], которые показывают, что предельная скорость плавания дельфина в условиях неволи составляет  $11 \pm 0,5$  м/с, что неплохо согласуется с расчетными данными, приведенными на рис. 13. Таким образом, способность дельфина повышать критическое число Рейнольдса и снижать степень турбулентности в пограничном слое (а, следовательно, и коэффициент сопротивления) благодаря значительному отрицательному градиенту давления позволяет ему экономно расходовать свою мощность. Правда, экономия не 7–8-кратная, как предполагал Грей, а всего лишь 2-кратная или несколько больше. Это обстоятельство, в частности позволяет хотя бы частично объяснить дальние миграции китообразных.

Результаты, полученные в процессе выполнения работ по грантам РФФИ, имеют фундаментальный характер и оказывают определяющее воздействие на развитие рассматриваемого

направления в мире. Они могут быть использованы на практике при проектировании технических плавниковых движителей.

### Раздел 3

Тематика проектов РФФИ полностью соответствует перечню актуальных проблем, указанных в начале обзора.

Исследовательский коллектив, сформировавшийся в Москве в начале шестидесятых годов прошлого века под руководством Е.В. Романенко, продолжает продуктивно работать (ссылки [38–47, 108, 117, 123–126]). Планируется выполнить математическое моделирование работы хвостовой лопасти дельфина с целью выявить ее эффективность в зависимости от положения оси вращения.

Предполагается получить расчетные формулы, удобные в использовании, что очень важно для технического моделирования плавникового движителя.

К сожалению, недостаток средств не позволяет проводить экспериментальные работы на дельфинах и привлекать к работе молодые кадры.

### Литература

1. Gray J. Studies of Animal Locomotion // J. Exp. Biol. 1933. Vol. 10. P. 88–103.
2. Gray J. Studies of Animal Locomotion. VI. The Propulsiv Power of the Dolphin // J. Exp. Biol. 1936. Vol. 13. № 2. P. 192–199.
3. Parry D.A. The swimming of whales and a discussion of Gray's paradox // J. Exp. Biol. 1949. Vol. 26. № 1. P. 24–34.
4. Lighthill M.J. Note on the Swimming of Slender Fish // J. Fluid Mech. 1960. Vol. 9. Pt 2. P. 305–317.
5. Smith E.H., Stone D.E. Perfect fluid forces in fish propulsion: The solution of the problem in an elliptic cylinder co-ordinate system // Proc. Roy. Soc. London A. 1961. Vol. 261. № 1306. P. 316–328.
6. Wu T. Y-T. Swimming of a waving plate // J. Fluid Mech. 1961. Vol. 10. Pt. 3. P. 321–344.
7. Лаврентьев М.А., Лаврентьев М.М. Об одном принципе создания тяговой силы для движения // Ж. прикл. мех. и техн. физ. 1962. № 4. С. 3–9.
8. Siekmann J. Theoretical studies of sea animal locomotion, part 1 // Ingenieur-Archiv. 1962. Bd. 31. № 3. P. 214–227.
9. Siekinann J. Theoretical studies of sea animal locomotion, part 2 // Ingenieur-Arch. 1963. Bd. 32. № 1. P. 40–53.
10. Rehman, Ph. D. «Project Notty». A Study of sea animal propulsion and acoustics // U.S. Naval Ordnance Test Station. China. 1961.
11. Lang T.G. Porpoise, whales and fish. Comparison of predicted and observe speeds // Naval Eng. J. 1963.
12. Lang T.G. Hydrodynamic analysis of cetacean performance // In: Whales Dolphins and Porpoises. Ed. by K.S. Norris. Berkeley-Los Angeles. Univ. Calif. Press. 1966a.
13. Lang T.G. Hydrodynamic analysis of dolphin fin profiles // Nature. 1966b. Vol. 209. № 5028. P. 1110–1111.
14. Lang T.G., Daybell D.A. Porpoise performance tests in a seawater tank // NAVWEPS Rep. 8060–NOTS Techn. Report. 1963. № 3063. Naval Ordnance Test Station. China Lake. Calif.
15. Lang T.G., Pryor K. Hydrodynamic Performance of Porpoises (*Stenella attenuata*) // Science. 1966. Vol. 152. № 3721. P. 531–533.
16. Lang T.G., Norris K.S. Swimming speed of a Pacific bottlnose porpoise // Science. 1966. Vol. 151. № 3710. P. 588–590.
17. Логвинович Г.В. Гидродинамика тонкого гибкого тела (оценка гидродинамики рыб) // Бионика. 1970б. Вып. 4. С. 5–11.

18. Логвинович Г.В. Гидродинамика плавания рыб // 13 Межд. конгресс по теорет. и прикл. механике. Тез. докл. 1972. С. 49.
19. Логвинович Г.В. Гидродинамика плавания рыб // Бионика. 1973а. Вып. 7. С. 3-8.
20. Меркулов В.И. Бегущая волна на упругом теле, движущемся в идеальной жидкости // Бионика. 1970. Вып. 4. С. 95-104.
21. Бабенко В.В., Гнитецкий Н.А., Козлов Л.Ф. Предварительные результаты исследования упругих свойств кожи живых дельфинов // Бионика. 1969. Вып. 3. С. 12-19.
22. Пятецкий В.Е. Гидродинамическая характеристика плавания некоторых быстроходных морских рыб // Бионика. 1970а. Вып. 4. С. 20-27.
23. Пятецкий В.Е. Кинематические характеристика плавания некоторых быстроходных морских рыб // Бионика. 1970б. Вып. 4. С. 11-20.
24. Пятецкий В.Е., Савченко Ю.Н. О влиянии слизи на гидродинамическое сопротивление рыб // Бионика. 1969. Вып. 3. С. 90-96.
25. Пятецкий В.Е., Каян В.П. Некоторые кинематические характеристики плавания дельфина азовки // Бионика. 1972. Вып. 6. С. 18-21.
26. Пятецкий В.Е., Каян В.П. Гидродинамические характеристики плавания афалины // Бионика. 1976. Вып. 10. С. 80-85.
27. Романенко Е.В. О гидродинамике рыб и дельфинов // Морское приборостроение. Научн.-техн. сборник. Серия Акустика. 1972. Вып. 1. С. 154-161.
28. Козлов Л.Ф., Шакало В.М. Некоторые результаты измерений пульсаций скорости в пограничном слое дельфинов // Бионика. 1973. Вып. 7. С. 50-52.
29. Романенко Е.В., Янов В.Г. Результаты экспериментов по изучению гидродинамики дельфинов // Бионика. 1973. Вып. 7. С. 52-56.
30. Янов В.Г., Романенко Е.В. Радиотелеметрическая система для измерения гидродинамических параметров дельфинов в условиях ограниченной акватории // Бионика. 1972. Вып. 6. С. 92-99.
31. Семенов Б.Н., Бабенко В.В., Каян В.П. Экспериментальное исследование некоторых особенностей гидродинамики плавания дельфинов // Бионика. 1974. Вып. 8. С. 23-31.
32. Стась И.И. Регистрация движений тела дельфина в море // ДАН СССР. 1939. Т. 24. № 6. С. 534-537.
33. Стась И.И. Еще о регистрации движений дельфина // ДАН СССР. 1939. 25. № 2.
34. Webb P.W. Hydrodynamics and energetics of fish propulsion // Bull. Fish. Res. Bd Can. 1975. Vol. 190. P. 1-159.
35. Yates G.T. Hydrodynamics of body and caudal fin propulsion // In: Fish Biomechanics (ed. P.W. Webb and D. Weihs).
36. Fish F.E., Hui C.A. Dolphin swimming – a review // Mamm. Rev. 1991. Vol. 21. P. 181-195.
37. Fish F.E. Power output and propulsive efficiency of swimming bottlenose dolphins (*Tursiops truncatus*) // J. exp. Biol. 1993а. Vol. 185. P. 179-193.
38. Романенко Е.В. Гидродинамика дельфинов // Успехи современной биологии. 1994. Т. 114. В. 3. С. 283-303. (Проект № 93-04-21415).
39. Романенко Е.В. Оценка тяги и коэффициента сопротивления дельфина // Успехи современной биологии. 1995. Т. 115. Вып. 1. С. 50-57. (Проект № 93-04-21415).
40. Романенко Е.В. Оценка тяги и коэффициента сопротивления дельфина // Тез. докл. Межд. Конф. «Плавание и полет в природе и технике AQUAPROP'95». 1995. С.-Петербург, СПбГМТУ. (Проект № 93-04-21415).
41. Романенко Е.В. Гидродинамика черноморской афалины // Черноморская афалина (отв. Ред. В.Е. Соколов, Е.В. Романенко). Москва.: Наука. 1997. С. 621-649. (Проект № 99-04-48317).
42. Романенко Е.В. Гидродинамика рыб и дельфинов. КМК. 2001. 412 с. (Проект № 93-04-21415).
43. Romanenko E.V. Swimming of dolphins (experiments and modelling) // SEB Symposium. Biological Fluid Dynamic. Abstracts. 1994. (Проект № 93-04-21415).
44. Romanenko E.V. The state of biohydrodynamic investigations in Russia (survey) // SEB Symposium. Biological Fluid Dynamic. Abstracts. 1994 (Проект № 93-04-21415).
45. Romanenko E.V. Swimming of dolphins: experiment and modelling // Biological Fluid Dynamics (Ed. Ellington C.P. and Pedley T.J.). The Company of Biologists Limited. Cambridge. 1995. P. 21-33. (Проект № 93-04-21415).

46. *Romanenko E.V.* Drag coefficient in the dolphin and mechanisms of its reduction (experiment and theory) // Book abstracts. 9 European drag reduction meeting. 1995. Universita di Napoli Federico II – Dipartimento di progettazione aeronautica, Ravello, Itali. (Проект № 93-04-21415).
47. *Romanenko E.V.* Fish and Dolphin Swimming. Pensoft. Sofia. 2002. 430 p.
48. *Haun J.E., Hendricks E.W., Borkat F.R., Kataoka R.W., Carder D.A., Chun N.K.* Dolphin Hydrodynamics. Annual Report FY 82. NOSC. 1983. 82 p.
49. *Robr J.J., Hendricks E.W., Quigley L., Fish F.E., Gilpatrick J.W.* Scardina-Ludwig. Observations of Dolphin Swimming Speed and Strouhal Number. Technical Report 1769. SSC 1998. 48 p.
50. *Fish F.E., Robr J.J.* Review of Dolphin Hydrodynamics and Swimming Performance. Technical Report 1801. 1999. 137 p.
51. *Каян В.П., Пятецкий В.Е.* Кинематика плавания дельфина афалины в зависимости от режима ускорения // Бионика. 1977. Вып. 11. С. 36–41.
52. *Козлов Л.Ф.* Теоретическая биогиродинамика. Киев: Вища школа. 1983. 238 с.
53. *Романенко Е.В., Шишмарев А.И., Янов В.Г.* Результаты экспериментального исследования гидродинамики дельфинов // 7 Всес. Акуст. конф. Тез. докл. 1971.
54. *Романенко Е.В.* Основы статистической биогиродинамики. М.: Наука. 1976. 168 с.
55. *Романенко Е.В.* Теория плавания рыб и дельфинов. М.: Наука. 1986. 148 с.
56. *Романенко Е.В.* Приемники пульсаций давления, предназначенные для работы с дельфинами // Труды Акустического института. 1971. Вып. 17.
57. *Романенко Е.В.* Приемник пульсаций давления. Авт. свид. на изобретение 1971. № 320739.
58. *Романенко Е.В.* Способ измерения пульсаций скорости в потоке жидкости // Морфология, физиология и акустика морских млекопитающих. 1974. С. 160–165.
59. *Романенко Е.В.* Акустика и гидродинамика некоторых морских животных // Акустический журн. 1976. Т. 22. Вып. 4. С. 628–629.
60. *Романенко Е.В.* Измеритель скорости потока жидкости или газа // Авт. свид. на изобретение № 607145. Бюллетень изобретений. 1978. № 18.
61. *Romanenko E.V.* The measuring devices as microfabricated pressure sensores for investigation of dolphins' boundary layer // Book of abstracts. 10 European drag reduction working meeting. 1997. Berlin.
62. *Романенко Е.В., Чикалкин В.А.* Магнитофон для подводной записи // Морфология, физиология и акустика морских млекопитающих. 1974. С. 165–173.
63. *Козлов Л.Ф., Шакало В.М.* Телеметрическая аппаратура для регистрации режимов течения в пограничном слое при движении в водной среде // Бионика. 1970. Вып. 4. С. 55–60.
64. *DuBois A.B., Cavagna G.A., Fox R.S.* Pressure distribution on body surface of swimming fish // J. Exp. Biol. 1974. Vol. 60. P. 581–591.
65. *Kramer, M.O.* Boundary layer stabilization by distributed damping // J. Aeron. Sci. 1957. Vol. 24. № 6.
66. *Kramer M.O.* The dolphins' secret // New Sci. 1960. Vol. 7. № 181. P. 1118–1120.
67. *Бабенко В.В.* Основные характеристики гибких покрытий и критерии подобия // Бионика. 1971а. Вып. 5. С. 73–76.
68. *Бабенко В.В.* Некоторые механические характеристики кожных покровов дельфинов // Бионика. 1971б. Вып. 5. С. 76–81.
69. *Бабенко В.В.* Методика определения механических свойств и обоснование выбора конструкций гибких покрытий // Бионика. 1973. Вып. 7. С. 71–79.
70. *Бабенко В.В.* Исследование упругости кожи живых дельфинов // Бионика. 1979. Вып. 13. С. 43–52.
71. *Бабенко В.В.* О колеблющейся массе кожных покровов дельфинов // Бионика. 1980. Вып. 14. С. 57–64.
72. *Бабенко В.В., Козлов Л.Ф.* Экспериментальные исследования гидродинамической устойчивости на жесткой и упруго-демпфирующих поверхностях // Изв. АН СССР. Механика жидкости и газа. 1973. № 1. С. 122–127.
73. *Бабенко В.В., Козлов Л.Ф., Першин С.В.* О переменном демпфировании кожи дельфинов на различных скоростях плавания // Бионика. 1972. Вып. 6. С. 42–52.
74. *Бабенко В.В., Козлов Л.Ф., Першин С.В.* Демпфирующее покрытие. Авторское свидетельство на изобретение (СССР). 1974. № 413286.

75. *Бабенко В.В., Козлов Л.Ф., Першин С.В., Томилин А.Г.* Самонастройка демпфирования кожи китообразных при активном плавании // Бионика. 1982. Вып. 16. С. 3–14.
76. *Бабенко В.В., Козлов Л.Ф., Коробов В.И.* Демпфирующее покрытие. Авторское свидетельство на изобретение (СССР). 1975. № 483538.
77. *Бабенко В.В., Козлов Л.Ф., Коробов В.И.* Регулируемое демпфирующее покрытие. Авторское свидетельство на изобретение (СССР). 1978. № 597866
78. *Бабенко В.В., Коваль А.П.* О гидродинамических свойствах кожных покровов водных животных // Бионика. 1989. Вып. 23. С. 38–42.
79. *Бабенко В.В., Никишова О.Д.* Некоторые гидродинамические закономерности строения кожных покровов морских животных // Бионика. 1976. Вып. 10. С. 27–33.
80. *Бабенко В.В., Суркина Р.М.* Некоторые гидродинамические особенности плавания дельфинов // Бионика. 1969. Вып. 3. С. 19–26.
81. *Бабенко В.В., Суркина Р.М.* Определение параметра колеблющейся массы кожных покровов некоторых морских животных // Бионика. 1971. Вып. 5. С. 94–98.
82. *Семенов Б.Н.* Интерференционное действие вязкоупругой поверхности на пристенную турбулентность. Автореф. докт. дисс. Новосибирск, 1999.
83. *Кулик В.М., Семенов Б.Н.* Об аттестации волновых свойств вязкоупругих покрытий, воздействующих на пристенную турбулентность // Гидродинамические течения и волновые процессы. ИТ СО АН СССР, Новосибирск, 1983. С. 117–129.
84. *Кулик В.М., Погуда И.С., Семенов Б.Н.* Экспериментальное исследование воздействия однослойных вязкоупругих покрытий на турбулентное течение и пульсации давления на стенке // Инж.-физ. ж. Т. 47. № 2. С. 189–196.
85. *Brett J.R.* The energy required for swimming by young sockeye salmon with a comparison of the drag force on a dead fish // Trans. Roy. Soc. Canada. 1963. Ser. 4. № 1. P. 441–457.
86. *Матюхин В.А.* Биоэнергетика и физиология плавания рыб. Новосибирск: Наука. 1973. 154 с.
87. *Ускова Е.Т., Момот Л.Н., Суркина Р.М.* и др. Изучение химической природы глазных выделений дельфина *Tursiops truncatus* // Ж. эволюц. биохимии и физиологии. 1975. Т. 11, № 4. С. 371–375.
88. *Ускова Е.Т., Шмырев А.Н., Раевский В.С., Богданова Л.Н., Момот Л.Н., Беляев В.В., Усков И.А.* О природе и гидродинамической активности глазных выделений дельфинов // Бионика. 1983. Вып. 17. С. 72–75.
89. *Lighthill M.J.* Large-amplitude elongated-body theory of fish locomotion // Proc Roy Soc. Lond. Ser. B. 1971. Vol. 179. № 1055. P. 125–138.
90. *Lighthill M.J.* Aquatic animal propulsion of high hydromechanical efficiency // J. Fluid Mech. 1970. Vol. 44. Pt 2. P. 265–301.
91. *Chopra M.G., Kambe T.* Hydrodynamics of lunate-tail swimming propulsion. Pt.2 // J. Fluid Mech. 1977. Vol. 79. Pt. 1. P. 49–69.
92. *Kambe T.* The dynamics of carangiform swimming motions // J. Fluid Mech. 1978. Vol. 87. Pt 3. P. 533–560.
93. *Романенко Е.В.* Некоторые вопросы теории плавания рыб и дельфинов // ДАН СССР. 1980б. Т. 253, № 5. С. 1082–1085.
94. *Романенко Е.В.* Экспериментальные исследования кинематики дельфинов // ДАН СССР. 1980. Т. 253, № 3. С. 741–743. (Перев. на англ. яз.: Plenum Publishing Corporation 1981. Doklady Biological Sciences).
95. *Videler J.J., Hess F.* Fast continuous swimming of two pelagic predators, saithe (*Pollachius virens*) and mackerel (*Scomber scombrus*): a kinematic analysis // J. Exp. Biol. 1984. № 109. P. 209–228.
96. *Hess, F., Videler J.J.* Fast continuous swimming of saithe (*Pollachius virens*): a dynamic analysis of bending moments and muscle power // J. Exp. Biol. 1984. Vol. 109. P. 229–251. New York: Praeger. 1983. P. 177–213.
97. *Першин С.В.* Основы гидробионики. Л.: Судостроение. 1988. 263 с.
98. *Логвинович Г.В.* Гидродинамика течения со свободными границами. Киев: Наукова думка. 1969. 210 с.
99. *Ландер Б.Е.* Ламинаризация турбулентного пограничного слоя при сильном ускорении течения // Прикл. механика. 1964. № 4. С. 151–153.

100. *Реник Е.У.* Экспериментальное исследование структуры турбулентного пограничного слоя при наличии продольного градиента давления // Труды ЦАГИ. 1970. Вып. 1218. С. 19–25.
101. *Назарчук М.М., Ковецкая М.М., Панченко В.Н.* Обратный переход турбулентного течения в ламинарное. Киев: Наукова думка. 1974. 96 с.
102. *Вуд Ф.Г.* Морские млекопитающие и человек: Пер. с англ. Л.: Гидрометеиздат. 1979. 262 с.
103. *Holst E., Kuechemann D.* Biological and aerodynamical problems of animals flight // J. Roy. Aero. Soc. 1942. Vol. 46. № 374. P. 39–56.
104. *Lighthill M.J.* Hydrodynamics of aquatic animal propulsion // Annual Rev. of Fluid Mech. Palo Alto. Calif. USA. Vol. 1. 1969. P. 413–446.
105. *Зайцев А.А., Федотов А.А.* Обтекание идеальной несжимаемой жидкостью тонкого крыла конечного размаха, колеблющегося с большой амплитудой // Механика жидкости и газа. 1986. № 5. С. 75–82.
106. *Каян В.П.* О гидродинамических характеристиках плавникового движителя дельфина // Бионика. Вып. 13. 1979. С. 9–15.
107. *Лойцянский Л.Г.* Механика жидкости и газа. М.: Гл. ред. ф.-м. лит. 1987. 840 с.
108. *Пушков С.Г., Романенко Е.В.* Гидродинамические силы, действующие на жесткое крыло при его движении с большими амплитудами поперечных и угловых колебаний // Успехи современной биологии. 2000. Т. 120. № 2. С. 207–216. (Проект № 96-04-48671).
109. *Седов Л.И.* Плоские задачи гидродинамики и аэродинамики. М.: Наука. 1966.
110. *Некрасов А.И.* Теория крыла в нестационарном потоке. М.: Изд. АН СССР. 1947. 258 с.
111. *Белоцерковский С.М., Скрипач Б.К., Табачников В.Г.* Крыло в нестационарном потоке газа. М.: Наука. 1971. 767 с.
112. *Vairstow L.* Applied Aerodynamics. Longmans, Green and Co. London–New York–Toronto. 1939.
113. *Гребешов Э.П., Сагоян О.А.* Гидродинамические характеристики колеблющегося крыла, выполняющего функции несущего элемента и движителя // Труды Цаги. Вып. 1725. 1976. С. 3–30.
114. *Янов В.Г.* Кинематика дельфинов. Новые результаты экспериментального изучения // Докл. АН СССР. 1990. Т. 315. № 1. С. 49.
115. *Янов В.Г.* Комплексный анализ кинематики дельфинов // Тез. докл. Межд. Конф. «Плавание и полет в природе и технике AQUAPROP'95». 1995. С.-Петербург, СПбГМТУ.
116. *Янов В.Г.* Комплексный анализ кинематики активного плавания черноморской афалины (*Tursiops truncatus*). Канд. дисс. 1996.
117. *Пушков С.Г., Романенко Е.В.* Роль хвостовой лопасти в формировании отрицательного градиента динамического давления на теле активно плывущего дельфина. // Успехи современной биологии. 2001. Т. 121. № 4. С. 399–404. (Проект № 99-04-48317).
118. *Скучик Е.* Основы акустики. Т. 2. М.: Мир. 1976.
119. *Шлихтинг Г.* Теория пограничного слоя. М.: Наука. 1974.
120. *Грушанская Ж.Я., Короткин А.И.* Некоторые вопросы гидродинамики дельфинов // 4 Всес. конф. по бионике. Тез. докл. М. Т. 6. 1973. С. 37–41.
121. *Корн Г., Корн Е.* Справочник по математике. М.: Наука. 1973. 832 с.
122. *Videler J.J., Kamermans P.* Differences between uostroke and downstroke in swimming dolphins // J. Exptl. Biol. 1985. Vol. 119. P. 265–274.
123. *Romanenko E.V.* The kinematics of the dolphin's flukes // Proceedings of a Symposia of the «Inspirations from Nature» 2000. Berlin. (Проект № 96-04-48671).
124. *Романенко Е.В., Пушков С.Г.* О положении оси вращения и угле атаки хвостовой лопасти дельфина. // Успехи современной биологии. 1997. Т. 117. Вып. 4. С. 496–504. (Проект № 96-04-48671).
125. *Романенко Е.В., Пушков С.Г.* Экспериментальное исследование кинематики хвостовой лопасти дельфина // ДАН. 1998. Т. 358. № 2. С. 274–276. (Проект № 96-04-48671)
126. *Романенко Е.В., Пушков С.Г., Лопатин В.Н.* Роль локомоторной волны в формировании тяги у рыб и дельфинов // Успехи современной биологии. 2000. Т. 120. № 6. С. 581–586. (Проект № 99-04-48317).