

ISSN 0233—6693



ИТОГИ НАУКИ И ТЕХНИКИ

КОМПЛЕКСНЫЕ
И СПЕЦИАЛЬНЫЕ
РАЗДЕЛЫ МЕХАНИКИ

Том I



Москва 1985

ГОСУДАРСТВЕННЫЙ КОМИТЕТ СССР
ПО НАУКЕ И ТЕХНИКЕ

АКАДЕМИЯ НАУК СССР

ВСЕСОЮЗНЫЙ ИНСТИТУТ НАУЧНОЙ И ТЕХНИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ

ИТОГИ НАУКИ И ТЕХНИКИ

СЕРИЯ

КОМПЛЕКСНЫЕ И СПЕЦИАЛЬНЫЕ РАЗДЕЛЫ МЕХАНИКИ

Том 1

Серия издается с 1985 г.

*Библиотека кафедры
гидромеханики МГУ*



МОСКВА 1985

НЕКОТОРЫЕ ПРОБЛЕМЫ БИОЛОГИЧЕСКОЙ
ГИДРО- И АЭРОДИНАМИКИ

Ж.Я. Грушанская, А.И. Короткин

ВВЕДЕНИЕ

Основной задачей бионики является исследование объектов живой природы с целью нахождения новых идей и принципов, которые возможно реализовать в той или иной области техники (W. Nachtigall [1]). В настоящем обзоре сделана попытка проанализировать состояние бионических исследований в части, имеющей своим приложением гидроаэродинамику различных технических средств. При этом рассматриваются главным образом работы, опубликованные за последние 10 лет, поскольку предыдущие публикации весьма квалифицированно обсуждены в обстоятельных обзорах Н.В. Кокшайского [1,2] и С. Ferrari [1]. Авторам данного обзора не удалось избежать обсуждения основных идей, выдвинутых в области бионической гидроаэродинамики до 1973 г. Известным оправданием здесь может служить то обстоятельство, что упомянутые выше обзоры Н.В. Кокшайского написаны с точки зрения специалиста-биолога, в то время как нижеследующие рассуждения отражают представления гидроаэродинамиков, целью которых является приложение закономерностей живой природы к техническим объектам.

Материал обзора разделяется по принципу обсуждения конкретных новых бионических идей применительно к гидроаэродинамике внешнего обтекания тел.

Процесс бионических исследований схематично можно разделить на три этапа. Первый этап – наблюдение за избранным живым объектом. Цель первого этапа состоит в сборе объективной информации о той или иной особенности живого организма. При этом условия эксперимента должны обеспечивать проявление исследуемой особенности в естественном виде. Ясно, что в работах на первом этапе должны принимать участие как биологи, так и гидроаэродинамики.

Второй этап – выявление на базе фактических данных, полученных на первом этапе, новых гипотез и идей, которые, возможно, реализованы природой в изучаемом живом организме. Сложность второго этапа состоит в том, что истинное назначе-

ние тех или иных особенностей строения и перемещения живых организмов распознать (за редким исключением) весьма сложно, ибо эти особенности (гидродинамические) определяются не только динамическим взаимодействием организма с окружающей средой, но и другими его жизненными функциями. Поэтому исследователям (гидродинамикам, биологам) на втором этапе, как правило, не удается сделать определенных выводов о достоверности выдвинутых гипотез.

Третий этап исследований является наиболее ответственным, поскольку включает в себя проверку полученных на втором этапе гипотез и идей. Если идея, возникшая при изучении животного, оказалась новой для гидромехаников, то ее проверка должна производиться на соответствующих моделях. В случае подтверждения эффекта рассматривается вопрос о применении этой идеи в технике. Кроме того, определенный интерес представляет решение вопроса об использовании исследуемой идеи живым организмом, что требует постановки специальных опытов. Если выдвинутые на втором этапе гипотезы объясняют наблюдаемые факты, но по существу не являются новыми в гидромеханике, то вопрос об использовании этих гипотез в технике, как правило, давно решен. Необходимо только убедиться, что в живой природе явления происходят согласно этой гипотезе. Важность последнего шага состоит в том, что подтверждение справедливости одной гипотезы исключает, как правило, несколько других гипотез, объясняющих изучаемое явление. Понятно, что для практики важны только новые гидромеханические идеи.

При анализе гидробионических исследований будем стараться классифицировать их по принадлежности к одному из трех перечисленных этапов.

Комплекс проблем аэрогидродинамики животных, движущихся в сплошной среде, можно достаточно четко разделить на следующие основные направления так же, как и в случае движения технических объектов: 1) проблемы, связанные с уменьшением сопротивления движению тела; 2) проблемы, связанные с созданием подъемной силы, если средняя плотность тела превосходит плотность сплошной среды; 3) проблемы, связанные с созданием тяги, предназначенной для преодоления силы сопротивления; 4) проблемы управляемости; 5) проблемы следности, которые, конечно, связаны с вопросами сопротивления.

Большинство работ по гидробионике (будем пользоваться этим термином, хотя более точным, возможно, является ис-

пользуемый Н.В. Кокшайским термин "биологическая гидродинамика") посвящено первому направлению. При этом, как правило, предполагается, что сопротивление живого объекта меньше сопротивления его жесткой модели. Последнее утверждение эквивалентно допущению о справедливости "парадокса Грея".

Авторы подобных работ, приняв без доказательств "парадокс Грея", выдвигают различные гипотезы, объясняющие, по их мнению, факт пониженного сопротивления у живых объектов. Ясно, что при подобной ситуации главной задачей является достоверное определение сопротивления живых объектов и сравнение его с сопротивлением соответствующих жестких моделей.

Вторая группа проблем касается птиц и насекомых, перемещающихся в воздушной среде. В этой группе можно выделить задачи повышения качества крыла, задачи нестационарной аэродинамики, связанные с повышением несущих свойств крыльев при нестационарном их движении с учетом взаимодействия нескольких крыльевых систем, задачи бесшумного полета (J. Lighthill [1]).

Третья группа проблем сводится к оценке эффективности движителей бионических объектов по сравнению с гребным винтом, применяемым на большинстве технических оамодвижущихся сооружений.

Вопросы управляемости, входящие в четвертую группу, гидробионикой, насколько известно авторам настоящего обзора, не охватывались.

Изучение структуры следа за живым объектом, движущимся в сплошной среде, в настоящее время представляет интерес главным образом в связи с задачей определения его сопротивления или тяги.

Несколько особо в гидробионике стоит задача воспроизведения геометрических форм животных и кинематических параметров их движения. Разработка теоретических чертежей животных совершенно необходима для создания их твердых моделей, испытания которых позволяют в определенной степени ответить на многие гидробионические вопросы. Кинематические характеристики движения животных требуются при оценках эффективности их движительного комплекса.

В заключение уместно подчеркнуть, что материал обзора имеет гидродинамический "уклон" и, не претендуя на исчерпывающую полноту, отражает точку зрения авторов на гидробионические проблемы.

ГЕОМЕТРИЧЕСКИЕ И ГИДРОДИНАМИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ МОРСКИХ ЖИВОТНЫХ

В данном разделе рассматриваются работы, посвященные анализу внешних обводов некоторых видов морских млекопитающих и рыб, а также изучению их гидродинамических характеристик. Формы тел этих животных могут представлять интерес с точки зрения их возможного использования в технике.

1.1. Геометрические и гидродинамические характеристики китообразных

Определение геометрических характеристик морских животных, в частности построение их теоретических чертежей, является весьма сложным делом, в процессе которого должны быть соблюдены, по крайней мере, два требования. Прежде всего, животное должно быть живым и находиться в естественной среде (воде). Кроме того, замеры надо производить инструментально, используя определенную базу для отсчета показаний. Совместить удовлетворительно указанные противоречивые требования удается, помещая, например, живого дельфина в наполненный водой прямоугольный ящик со стеклянными стенками, ребра граней которого служат своеобразными осями координат. Понятно, что таким образом получить данные для построения теоретического чертежа крупных китообразных представляется задачей нереальной. Замеры, произведенные на морских животных, лежащих на плоскости, в воздушной среде, или мертвых животных, или на их замороженных телах, могут внести существенные искажения в геометрические характеристики их тел и, соответственно, в построенные по этим замерам теоретические чертежи. Использование для построения обводов "вырезок" — полос шириной 6–10 см (С.В. Першин [5]) — является весьма приближенным и нежелательным методом, так как контур "вырезки", лежащей на плоскости, может не соответствовать контуру сечения в теле животного. Кроме того, на базе "вырезок" сложно создать теоретический чертеж всего тела, поскольку трудно правильно расположить полученные сечения друг относительно друга вдоль продольной оси тела. Наиболее достоверные данные для построения теоретических чертежей черноморских видов дельфинов (рис. 1, а, б, в) были получены в результате обмеров живот-

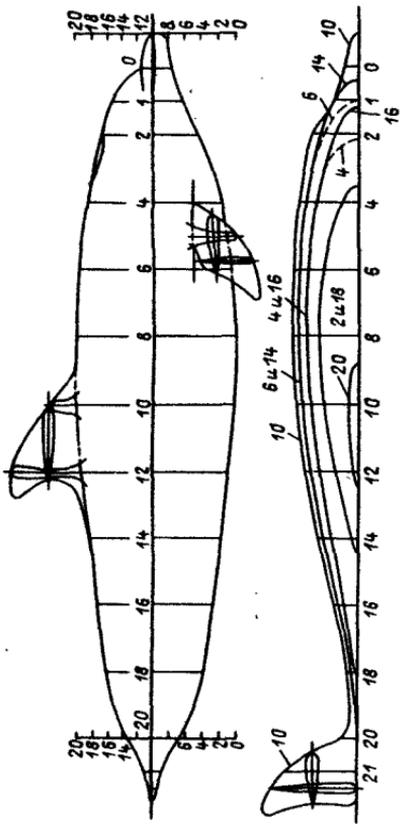
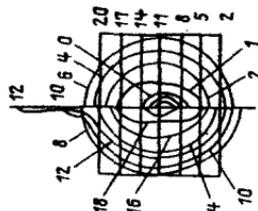
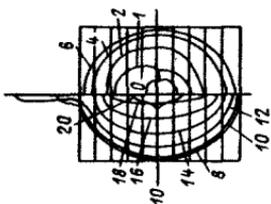
ных, находившихся наплаву в специальной ванне (В.Д. Бураков, Ж.Я. Грушанская и В.Е. Соколов [1]), что исключало деформацию тел. Для замеров было выбрано положение тела животного, вытянутого в длину, т.е. положение в момент скольжения по инерции в горизонтальной плоскости. При этом замерялись периметры 5 – 6 сечений: у места прикрепления грудных плавников, у начала спинного плавника и два – три сечения между задней кромкой спинного и хвостовым плавником. Место размещения этих сечений по длине тела фиксировалось с двух сторон – от переднего края нижней челюсти и от развилки хвостового плавника. Кроме того, были сделаны гипсовые слепки с голов и всех плавников дельфинов, которые затем тщательно измерялись на разметочной плите. Профили сечений плавников приводились к симметричному виду относительно спрямленной средней линии.

Основные геометрические характеристики черноморского дельфина обыкновенного, афалины и морской свиньи приведены в таблице 1, где большинство размеров отнесено к длине корпуса L без роострума и хвостового плавника (общая длина животного обозначена L_0).

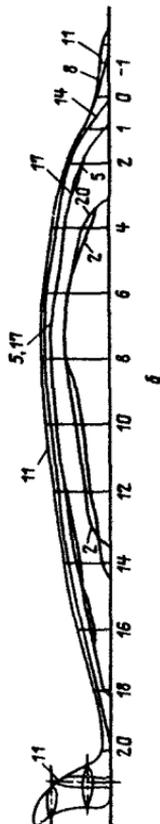
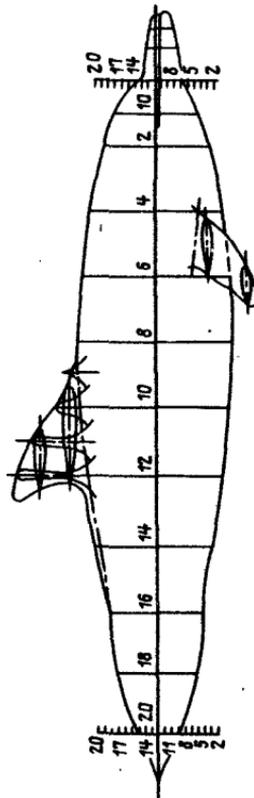
Анализ геометрических характеристик трех видов черноморских дельфинов и сравнение с соответствующими характеристиками других видов, известных в литературе (Н. Hertel [1], С. Gibbs-Smith [1]), приводит к выводу о достаточной близости ряда относительных размеров тел и плавников. Так, удлинение тел дельфинов L_0/V меняется в пределах 5,2–6,3, что весьма близко к удлинению тела, имеющего минимальное сопротивление при полностью турбулентном режиме течения в пограничном слое. Дело в том, что при заданном объеме выгодно иметь наименьшую смоченную поверхность. Однако уменьшение удлинения (в пределе для шара $L_0 = V$) может привести к отрыву пограничного слоя и росту сопротивления давления. Экспериментальные данные показывают, что без учета работы движителя оптимальным является удлинение порядка 6–7. Движитель, ускоряя поток в кормовой части, предотвращает появление возможных отрывов и позволяет несколько уменьшить величину удлинения движущегося тела.

Эллиптичность поперечных сечений шпангоутов корпуса увеличивается по направлению к хвостовой части, что, очевидно, связано с расположением мышц, осуществляющих движение хвостового плавника в вертикальной плоскости.

Помимо удлинения необходимо указать на следующие геометрические характеристики, близкие у разных видов дельфинов:



a



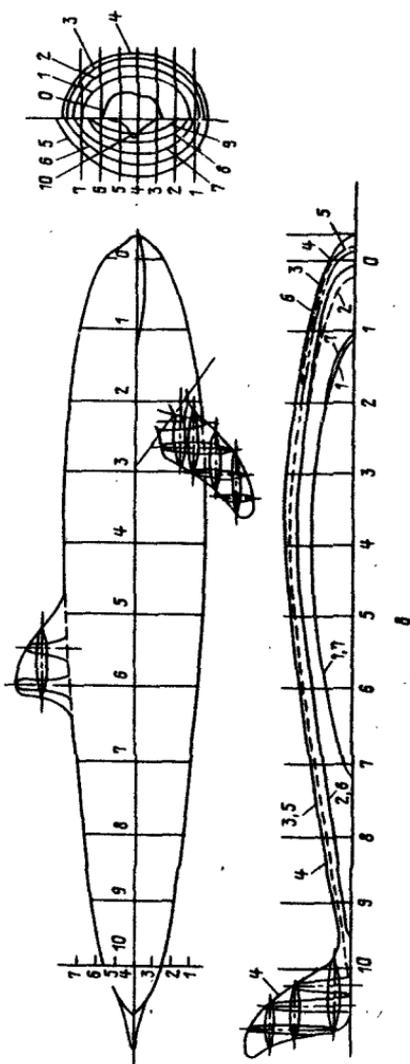


Рис. 1. Теоретические чертежи черноморских дельфинов: а - афалины, б - бобочки, в - морской свиньи

большая относительная толщина профилей поперечных сечений хвостовых, спинных и грудных плавников (0,18 - 0,26), положение абсциссы максимального сечения (0,3-0,35) от передней кромки профиля.

Подробные экспериментальные исследования формы сопряжения спинного плавника дельфина с корпусом и обтекания спинного плавника жесткой модели дельфина афалины (Ж.Я. Грушанская, А.И. Короткин и В.А. Тюшкевич [1]) были проведены в аэродинамической трубе. Однако при использовании на технических объектах геометрических соотношений, определенных в результате изучения сопряжения корпуса тела дельфина и его спинного плавника и полученных на базе теоретического чертежа дельфина, необходимо помнить, что спинной плавник дельфина хорошо обтекается, будучи расположенным на конкретном корпусе. Если меняются геометрические характеристики основного тела или место расположения "препятствия", то должна измениться и оптимальная форма сопряжения его с корпусом; иначе говоря, нельзя автоматически переносить геомет-

Таблица 1

Показатель	Обозначение	Дельфин обыкновенный	Морская свинья	Афалина
Длина роострума	L_1/L	0,092	-	0,05
Длина хвостового плавника	L_2/L	0,11	0,13	0,104
Наибольшая высота корпуса (без спинного плав- ника)	H/L_0	0,215	0,176	0,209
Наибольшая ширина корпуса	B/L_0	0,191	0,16	0,175
Степень эллиптич- ности	B/H	0,89	0,91	0,834
Площадь хвостового плавника	S/L^2	0,0115	0,021	0,023
Площадь спинного плавника	S_1/L^2	0,00847	0,00676	0,0113
Площадь грудного плавника	S_2/L^2	0,0076	0,00955	0,007
Площадь смоченной поверхности корпу- са с роострумом	Ω/L^2	0,432	0,445	0,52
Площадь миделевого сечения	S_M/L^2	0,0338	0,0429	0,0378
Полное водоизме- щение	V/L^3	0,017	0,016	0,0218
Абсцисса положения наибольшей ширины, считая от носика	x/L_0	0,426	0,404	0,41
Угол наклона спинно- го плавника по от- ношению к горизон- тальной плоскости	α^0	34	39	36

рические соотношения тел животных и их плавников на любые случаи приложения их к техническим объектам.

Особое место в работах о геометрических характеристиках дельфинов занимают исследования, связанные с изучением формы в плане и профилей сечений плавников животных, особенно хвостового плавника. Фотографии хвостовых плавников различных дельфинов имеются в статье С.В. Першина [2]. Профили сечений хвостовых и спинных плавников дельфинов приводятся в работе В.Л. Бурлакова, Ж.Я. Грушанской и В.Е. Соколова [1]. Сравнение известных в гидродинамике характеристик крыльев и аналогичных характеристик крыльев с "дельфиньим" профилем содержится в работе Ж.Я. Грушанской, А.И. Короткина и В.А. Тюшкевича [1]. Исследовалась следующая серия изолированных крыльев: крыло I полностью воспроизводило форму в плане и сечения хвостового плавника черноморского дельфина афалины; крылья II, III и IV были прямоугольными в плане с профилем, аналогичным профилю крыла I в сечении, расположенном на 0,25 размаха от кромки. Крыло II имело площадь и размах, равные площади и размаху крыла I. Крыло III имело хорду и размах, равные максимальной хорде и размаху крыла I (крыло I вписывалось в контур крыла III). Крыло IV имело площадь, равную площади крыла I и хорду, равную хорде крыла III. Максимальная относительная толщина профиля всех крыльев составляла 26% от хорды и располагалась на расстоянии $x/l = 0,27$ от носика крыла (l - хорда крыла). Геометрические и гидродинамические характеристики описанной серии крыльев приведены в таблице 2.

Таблица 2

Крыло	Размах $b, м$	Хорда $l, м$	Площадь $S, м^2$	Удлинение $\lambda = \frac{b^2}{S}$	Коэффициент сопротивления $C_x (\alpha = 0)$	Производная от коэффициента подъемной силы по углу атаки $\left(\frac{\partial C_y}{\partial \alpha}\right)_{\alpha = 0}$
I	1.42	-	0,5	4,03	0,012	2,88
II	1,42	0,352	0,5	4,03	0,013	2,88
III	1,42	0,45	0,64	3,16	0,016	2,43
IV	1,11	0,45	0,5	2,46	0,015	2,40

Эксперименты проводились в аэродинамической трубе при числе Рейнольдса $U/\nu = 2 \cdot 10^6$. Рассмотрение таблицы 2 позволяет заключить, что форма крыла в плане, характерная для хвостовых плавников дельфина, обеспечивает несущие свойства такие же, как у прямоугольных крыльев с максимальным удлинением того же профиля. При этом коэффициент сопротивления крыла I при угле атаки $\alpha = 0$ несколько меньше, чем у прямоугольных в плане крыльев. Это объясняется, вероятно, различным характером обтекания торцов крыльев. Обтекание торцов прямоугольных крыльев сопровождается вихреобразованием и соответствующим увеличением сопротивления (К.К. Федяевский и Н.Н. Фомина [1]). Различие в сопротивлении крыла I и прямоугольных крыльев с увеличением угла атаки должно возрастать за счет индуктивного сопротивления, которое у крыла I будет меньше, поскольку по своей форме в плане оно ближе к крылу минимального индуктивного сопротивления (эллиптическому крылу).

Особенностью профилей поперечных сечений плавников дельфинов является значительная относительная толщина (26%). На технических объектах относительная толщина профилей крыльев определяется, как правило, соображениями прочности, причем обычно стремятся сделать крылья по возможности тоньше. Ясно, что у животных относительная толщина плавников определяется биологическими особенностями организма. Поэтому о возможности использования формы поперечных сечений плавников дельфинов в технике можно сказать следующее. Если по каким-либо причинам толщина крылового профиля выбирается 25–27% от хорды и число Рейнольдса при обтекании крыла имеет порядок 10^6 (примерное число Рейнольдса при обтекании плавников дельфинов), то целесообразно обратиться к профилям сечений дельфиновых плавников, не забывая, однако, что они принадлежат крылу специфической формы в плане.

Экспериментальное изучение гидродинамических характеристик жесткой модели дельфина в аэродинамической трубе показало, что коэффициенты позиционных сил и моментов (рис. 2, а, б, в) модели дельфина практически не отличаются от известных в аэро- и гидродинамике соответствующих характеристик тел вращения сопоставимых с дельфином геометрических размеров. Некоторое отличие наблюдается только в характере кривых зависимостей коэффициента гидродинамического сопротивления C_{x1} (определенного в связанной системе координат) и демпфирующего момента m_{z1} от угла атаки α .

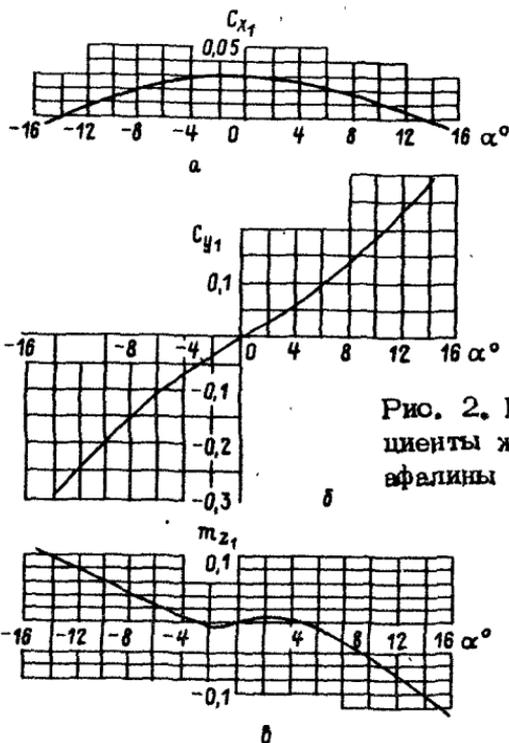


Рис. 2. Гидродинамические коэффициенты жесткой модели дельфина афалины

Кривая $C_{x1}(\alpha)$ имеет максимальное значение при $\alpha = 0 \pm 14^\circ$, затем уменьшается, обращается в нуль при $\alpha = \pm 14^\circ$. Коэффициент m_{z1} максимальное значение принимает при $\alpha = 0$, затем его величина уменьшается, при $\alpha = 14^\circ$ обращается в нуль и при дальнейшем увеличении угла атаки $m_{z1} < 0$. Этот факт свидетельствует о малой степени статической неустойчивости модели дельфина. Характер обеих зависимостей, $C_{x1}(\alpha)$ и $m_{z1}(\alpha)$, может быть объяснен наличием у модели дельфина мощного горизонтального стабилизатора - хвостового плавника, имеющего большую площадь.

1.2. Геометрические и гидродинамические характеристики рыб

Описание геометрических характеристик рыб можно найти в монографии Ю.Г. Алеева [1], а также в работах, упомянутых в обзоре Н.В. Кокшайского [2], который совершенно справедливо обращает внимание на недопустимость сравнения профилей крыльев технических объектов с профилями сечений рыб диаметральной плоскостью, поскольку обычно относительное

удлинение крыльев $\lambda = B/L \geq 1$ (B — размах крыла, L — хорда крыла), в то время как для тела рыбы $\lambda \ll 1$. Поэтому основные гидродинамические параметры обтекания (линии тока, распределение скоростей и давлений) на теле рыбы и крыле с профилем, аналогичным профилю диаметрального сечения рыбы, будут различными.

Рассмотрим некоторые вопросы, относящиеся к виду внешних обводов рыб и имеющие, возможно, определенное отношение к оптимизации условий движения тел в жидкости при различных граничных условиях: в безграничной среде, вблизи свободной поверхности и вблизи твердой стенки.

Меченосные рыбы

Вид внешних обводов меч-рыбы всегда привлекал в себе внимание исследователей. Из основных работ следует назвать книгу В.В. Овчинникова [1], статьи С.В. Першина [6], С.С. Золотова и Я.С. Ходорковского [1], Л.Ф. Козлова и И.В. Леоненко [1], М.А. Басина, Б.В. Косова, Н.Н. Ксенжонок и В.П. Шадрина [1]. Чаще всего предпринимаются попытки объяснить целесообразность с гидродинамической точки зрения наличия у меч-рыбы вытянутого рострума. Расчеты сопротивления трения, проведенные в упомянутых работах С.С. Золотова и Л.Ф. Козлова, показали, что наличие в носовой части тела тонкого длинного наконечника может приводить к уменьшению сопротивления трения на 10–15% по сравнению с сопротивлением того же тела без наконечника. Выигрыш в сопротивлении зависит от относительной длины наконечника и величины его смоченной поверхности. Данные экспериментов, приведенные в работе Л.Ф. Козлова и И.В. Леоненко [1], качественно подтверждают этот вывод. В опытах было получено снижение сопротивления модели с наконечником на 7–8% по сравнению с моделью без наконечника, хотя последняя имела площадь смоченной поверхности на 5,5% меньше.

Группа авторов во главе с М.А. Басиным провела испытания модели меч-рыбы (модель была изготовлена по созданному этими же авторами теоретическому чертежу) длиной $L = 1$ м в аэродинамической трубе, опытовом и кавитационном бассейнах. Измерялись сила сопротивления, подъемная сила, распределение давления на поверхности модели при разных углах атаки, расстояниях модели от свободной поверхности воды и различных скоростях буксировки (диапазон чисел Фруда, построенных по длине модели, изменялся в пределах $Fr = U/\sqrt{gL} =$

= 0 ÷ 4). В кавитационном бассейне испытания проводились в диапазоне чисел кавитации

$$\kappa = \frac{p_a - p_b - p_d - \gamma h}{\rho U^2 / 2} = 0,08 \div 0,88$$

(p_a — атмосферное давление, p_b — давление над свободной поверхностью воды в корпусе кавитационного бассейна, p_d — давление насыщенных паров воды при данной температуре, ρ , γ — удельная плотность и удельный вес воды, U — скорость буксировки модели, h — отстояние модели от свободной поверхности). При этом кроме суммарных сил, действующих на модель, фиксировались с помощью фотоаппаратуры форма и положение кавитационной каверны. В результате проведенного исследования авторами работы сделан вывод, что тела с обводами меч-рыбы имеют преимущество по сравнению с телами вращения традиционных форм при движении под свободной поверхностью, благодаря уменьшению волнового сопротивления.

Обсуждая назначение рострума у меч-рыбы, нельзя не учитывать и такой фактор, как высокие значения удельного давления в районе передней критической точки тела и большие касательные напряжения на поверхности в носовой части при максимальных скоростях плавания. Ясно, что для живого организма предпочтительной представляется такая ситуация, при которой участки с максимальными нормальными и касательными напряжениями приходится на жесткий, относительно тонкий мечевидный отросток.

Летучие рыбы

Вид внешних обводов летучих рыб представляет интерес как пример строения живого объекта, движущегося вблизи свободной поверхности воды. В статье Ж.Я. Грушанской и А.И. Короткина [1] приводится теоретический чертеж одного из видов летучих рыб, построенный на основании обмеров серии из 60 экземпляров рыб (рис. 3). Одной из основных особенностей — геометрических характеристик корпуса этих рыб является своеобразная форма поперечных сечений (шпангоутов), близкая к прямоугольной. Только носовая и хвостовая части корпуса рыб заострены, центральная же часть имеет почти плоские "палубу", "днище" и боковые поверхности. На брюшной поверхности рыбы существует своеобразный плоский ре-дан.

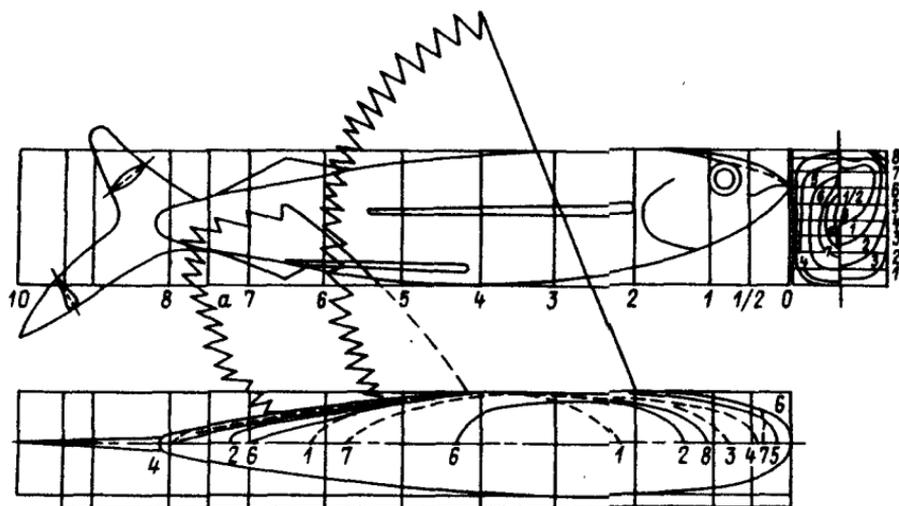


Рис. 3. Теоретический чертёж летучей рыбы

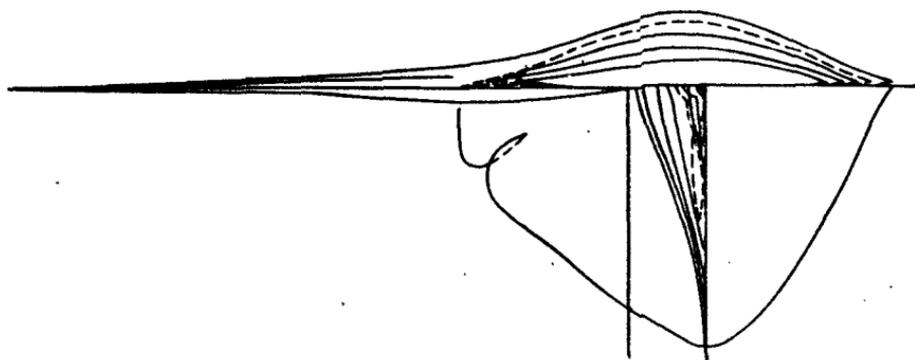


Рис. 4. Теоретический чертёж ската (морского кота)

Киносъёмка летучих рыб (J. Gray [2], Н. Hertel [1]) показывает, что перед выпрыгиванием из воды и полетом по воздуху рыба разгоняется. При этом ее корпус с расправленными крыльями-плавниками находится в воздухе, а нижняя, более крупная лопасть хвостового плавника продолжает оставаться погруженной в воду и интенсивными колебаниями создает тягу. В таком режиме разгона летучая рыба глиссирует по поверхности воды. Крыльевая система рыбы обеспечивает воздушную разгрузку, а весь корпус, находясь в воздухе, испытывает значительно меньшее, чем в воде, сопротивление. В упомянутой работе Ж.Я. Грушанской и А.И. Короткина [1] приводятся аэродинамические характеристики жесткой модели летучей рыбы

(длина модели $L = 1$ м) с расправленными плавниками, полученные в результате испытаний в аэродинамической трубе. Отмечается билланное расположение крыльев с выносом вперед верхней пары.

Черноморские скаты

Геометрические характеристики скатов интересны с точки зрения изучения строения животного, движущегося вблизи твердой стенки — дна водоема \perp и имеющего отрицательную плавучесть. Результаты исследования черноморского ската — морского ската *Dasyatis pastinaca* — приведены в статье М.В. Бегака, Ж.Я. Грушанской и В.П. Шадрина [1]. Авторами был построен теоретический чертеж морского кота — одного из видов скатов, обитающих вблизи дна (рис. 4). Для этого были измерены пять экземпляров рыб. Форма тела ската характеризуется следующими особенностями: а) ромбовидная в плане форма тела с удлинением $B/L = 1.33$ (L — длина тела, B — его размах); б) плоская нижняя поверхность; в) передняя кромка тела острая и приподнята на 1–1.5% от хорды соответствующего продольного сечения; плоская часть нижней поверхности начинается на расстоянии 0.1–0.15 хорды от передней кромки; г) контур диаметрального сечения тела имеет точки перегиба в передней и задней частях; д) продольные сечения тела имеют относительную максимальную толщину профиля 4.5–8% от соответствующей хорды; максимальная толщина находится на расстоянии 0.3–0.4 хорды от передней кромки; е) относительная кривизна продольных сечений $\bar{f} = f/b$ (f — стрелка прогиба средней линии профиля сечения, b — хорда этого профиля) меняется по размаху в пределах 0–4%.

Приведенные величины геометрических параметров тела ската свидетельствуют о том, что его форма близка к характеристикам крыльев, оптимальных при движении вблизи твердой границы. Под оптимальными понимаются крылья, имеющие максимальное гидродинамическое качество, т.е. максимальное отношение подъемной силы к сопротивлению. Результаты известных в аэродинамике исследований показывают, что при движении вблизи дна оптимальными являются крылья с плоской нижней поверхностью, относительной толщиной профиля 5–9% и кривизной средней линии 3–4%. В указанные диапазоны величин хорошо укладываются геометрические характеристики тела ската.

Сравнение гидродинамических характеристик твердой модели ската с соответствующими характеристиками прямоугольных крыльев такого же удлинения и круглых крыльев (Ж.Я. Грушанская и А.И. Короткин [1]), испытанных вблизи твердого экрана в аэродинамической трубе, показало, что гидродинамическое качество твердой модели ската несколько выше. Это можно объяснить хорошей приспособленностью ската к существованию и передвижению вблизи дна.

Возможность применения изученных геометрических форм морских животных и рыб, как видно из ряда работ, привлекла в первую очередь судостроителей. Z.Lukašik [1] в обзорной статье об использовании в судостроении результатов изучения морских млекопитающих и рыб сообщает, что в США, Англии и Японии создаются суда с нетрадиционными формами корпуса. В частности, в Англии спроектирован атомный подводный рудовоз грузоподъемностью 28000 т со скоростью 50 км/ч, форма корпуса которого близка к форме тела кита. В работе T.Murakami [1] приводятся результаты экспериментального исследования в опытовом бассейне ряда моделей подводного аппарата круглой формы, прообразом которого автор называет некоторых морских рыб, в первую очередь ската. Результаты проведенного исследования показывают, что испытывавшиеся "блюдца" обладают весьма высоким гидродинамическим качеством, хорошей маневренностью, что позволяет рекомендовать круглую форму подводного аппарата для конструирования таких подводных судов, как спасатели,двигающиеся на определенной глубине подводные танкеры и т.п. Однако не следует забывать, что в указанной статье речь идет об испытаниях моделей, диаметр которых был равен 1 м. Никаких данных об использовании полученных результатов при постройке натуральных судов нет.

Помимо экспериментальных работ следует указать на чисто теоретические разработки – расчеты на ЭЦВМ, в основу которых положены требования оптимальных (для соответствующих условий) гидродинамических характеристик тел (минимально возможного сопротивления, безотрывности обтекания и т.п.). Это работы R. Goodson'a [1] и F. Goldschmied'a [1]. Полученные в обоих случаях обводы тел вращения по своим параметрам достаточно близки геометрическим характеристикам тел дельфинов.

"ПАРАДОКС ГРЕЯ" И СВЯЗАННЫЕ С НИМ ПРОБЛЕМЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ СКОРОСТИ, СОПРОТИВЛЕНИЯ И МОЩНОСТИ МОРСКИХ ЖИВОТНЫХ

Попытки разобраться в достоверности "парадокса Грея", как отмечает Н.В. Кокшайский [2], "составили целую эпоху в биологической гидродинамике".

Сам Д. Грей (J. Gray [1]) сформулировал свое утверждение следующим образом: "Если меня спросят о самом способном пловце, который создан природой, то я без сомнения назову дельфина. Дельфин может развивать скорость до 20-25 узлов, и хотя мы точно не знаем, как долго он может поддерживать эту скорость, утомляется дельфин, очевидно, не так быстро, как рыбы. Дельфины — млекопитающие, теплокровные животные и дышат легкими, как и мы. Эти преимущества позволяют дельфинам обновлять свою мускульную энергию значительно быстрее рыб. Если мы рассмотрим эти факторы совместно, то дельфин окажется весьма примечательным животным: если сопротивление, которое испытывает дельфин при движении в воде, равно сопротивлению твердой модели равной величины и формы, то мышцы, приводящие в движение хвостовой плавник, должны быть примерно в десять раз мощнее, чем двигательные мышцы собаки или человека. Иначе говоря, если мускульная сила дельфина равна мускульной силе других млекопитающих животных, то вода, обтекающая дельфина, должна оказывать сопротивление в десять раз меньше, чем при обтекании твердой модели. Отсюда следует, что природное строение дельфина во много раз превосходит по энерговооруженности такие произведения рук человека, как подводная лодка и торпеды".

Так без объективных доказательств был сформулирован "парадокс Грея". Получение достоверного ответа на вопрос о существовании обсуждаемого парадокса является достаточно важной задачей. В случае положительного решения следует признать существование у дельфинов каких-то неизвестных пока способов снижения сопротивления, поскольку удельная мощность мышц всех млекопитающих примерно одинакова. Определение этих способов снижения сопротивления и их использование в технических приложениях могло быть конечной целью данного направления бионических исследований.

Если сопротивление твердой модели дельфина определить достаточно просто на существующих экспериментальных уста-

новках (А.А. Русецкий [1]), то сопротивление живого дельфина получить можно только косвенными методами. Среди этих методов наиболее распространенным является метод определения сопротивления по известной мощности животного и его соответствующей скорости (Л.Ф. Козлов [2]). Поэтому ниже рассматриваются методы определения скорости, мощности и сопротивления дельфинов (И.М. Петрова [1], Е.В. Романенко [1], А.В. Яблоков, В.М. Белькович и В.И. Борисов [1], Г.М. Кузьменко [1], Ж.Я. Грушанская [1]).

2.1. Скорости движения дельфинов

Данные о скоростях плавания дельфинов подразделяются на две группы. К первой относятся сведения о скоростях плавания диких дельфинов. Ко второй — результаты экспериментов по замеру скоростей плавания прирученных, специально тренированных животных. Сводные таблицы значений скоростей плавания дельфинов по опубликованным работам в зависимости от времени выдерживания данной скорости приведены в статьях С.В. Першина [2, 3] и Л.Ф. Козлова и О.Д. Никишовой [1]. Наблюдения в открытом море зафиксировали скорости плавания дельфинов порядка 9–13 м/с. Приведенные цифры следует воспринимать критически, так как значительное удаление дельфинов от судна (в среднем 0,5 мили), полное отсутствие специальных приборов могут служить причиной значительных ошибок в определении скорости плавания диких дельфинов. Кроме того, при определении скорости плавания дельфинов в открытом море следует учитывать, что они могут использовать для своего движения гидродинамическое поле давлений движущегося судна (Н. Focke [1]), а также энергию корабельных и ветровых волн (А.И. Короткин [1]).

Расчеты показывают, что в районе форштевня движущегося судна всегда найдется такая область повышенного давления, изменяющегося по продольной координате, что тело дельфина, помещенное в эту область, будет испытывать толкающее усилие, обусловленное продольным градиентом давления. Величина этого усилия на определенных расстояниях от носовой оконечности судна может полностью компенсировать силу сопротивления воды движению дельфина. Поэтому располагаясь перед носом идущего судна, дельфин при любой скорости движения последнего перемещается в воде, не затрачивая собственных усилий.

Если дельфин удерживается на переднем склоне бегущей волны, то при определенном соотношении между длиной волны, ее относительной высотой, объемом животного, его смоченной поверхностью и коэффициентом сопротивления может возникнуть ситуация (найдется такое место на склоне волны), когда животное будет переноситься по поверхности моря со скоростью распространения волны, не меняя своего положения относительно ее профиля и не затрачивая никакой работы на свое перемещение. Поскольку механизм перемещения с волной предметов, плавающих на поверхности воды (небольшие суда на крупных волнах, лодки, спортсмены, катающиеся на специальных досках), одинаков, представляется целесообразным привести основные соотношения, определяющие возможность перемещения тела с волной.

Рассмотрим положение дельфина на переднем склоне волны (рис. 5), перемещающейся в отрицательном направлении оси x со скоростью v_0 . Если пользоваться линейной теорией волн (Н.Е. Кочин, И.А. Кибель и Н.В. Розе [1]), то уравнение профиля волны можно записать в форме

$$z = -a \cos(kx + \sigma t), \quad (1)$$

где a — амплитуда волны, k — пространственная частота, σ — временная частота, $v_0 = \sigma/k$. Пусть дельфин располагается вдоль свободной поверхности волнового профиля в том месте, где наклон поверхности определяется углом θ . На тело дельфина действует сила веса P , направленная по вертикали, и архимедова сила поддержания, направленная по нормали к свободной поверхности волны, так как линии равного давления в волне вблизи границы раздела сред проходят эквидистантно свободной поверхности, давление на которой постоянно и равно атмосферному. Выталкивающая сила поддержания R уравновешивается составляющей силы веса $P_1 = P \cos \theta$. Поскольку удельный вес тела дельфина примерно равен удельному весу воды, а $P_1 = R < P$, часть тела дельфина должна располагаться вне воды, что и наблюдается в натуральных условиях при скольжении дельфина на волне. Кроме силы $P_1 = R_1$ на тело дельфина действует оставшаяся вес $P_2 = P \sin \theta$, направленная вдоль склона волны. Под действием этой составляющей дельфин движется вдоль склона волны со скоростью v , которую можно определить из соотношения

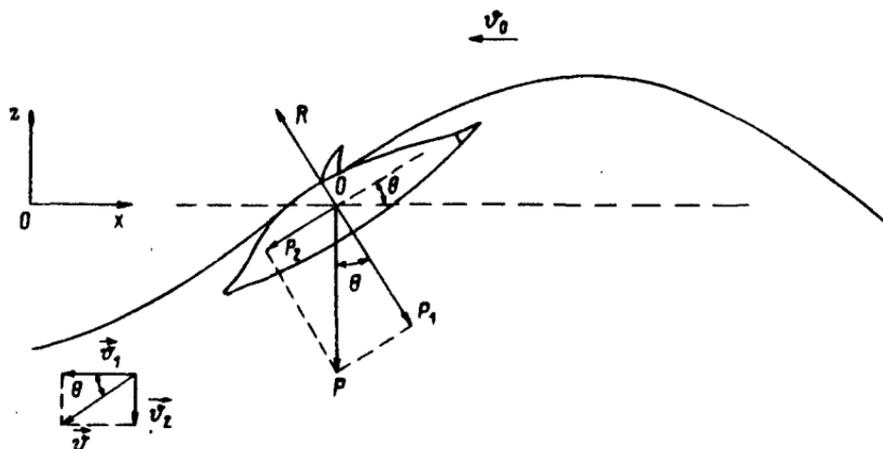


Рис. 5. Схема движения дельфина с бегущей волной

$$P_2 = C_x \frac{\rho v^2}{2} S,$$

где ρ — массовая плотность воды, C_x — коэффициент сопротивления дельфина, S — площадь его смоченной поверхности, $v = (2P_2/C_x \rho S)^{1/2}$. Вектор скорости v можно разложить на горизонтальную составляющую $v_1 = v \cos \theta$ и вертикальную составляющую $v_2 = v_1 \operatorname{tg} \theta$, определяющую перемещение дельфина относительно воды в направлении оси z в том случае, если бы профиль волны был неподвижен и дельфин соскальзывал с волнового склона. Фактически жидкость в месте расположения дельфина перемещается, причем вертикальная составляющая скорости точек вблизи поверхности воды определяется с учетом (1) выражением

$$v_z = \frac{\partial z}{\partial t} = a \sigma \sin(kx + \sigma t) \quad (2)$$

и направлена в точке расположения центра тяжести дельфина вертикально вверх. Принимая во внимание соотношение $\operatorname{tg} \theta = \partial z / \partial x = a k \sin(kx + \sigma t)$, $v_0 = \sigma / k$, получаем на основании (2) $v_z = v_0 \operatorname{tg} \theta$.

Для того чтобы дельфин не смещался по вертикали, скорость его смещения вниз относительно воды (v_z) должна равняться скорости подъема воды в месте его расположения (v_z). При этом будет выполняться условие $v_1 = v \cos \theta = v_0$. Фор-

мулу для скорости v можно записать, пользуясь условием, что удельный вес дельфина примерно равен удельному весу воды,

$$v = \left(\frac{2Wg \sin \theta}{C_x S} \right)^{1/2},$$

где W — объем тела животного, g — ускорение силы тяжести. Условие, при котором дельфин может перемещаться вместе с волной, следует записать в форме

$$v(\theta_*) \cos \theta_* \geq v_0, \quad (3)$$

где θ_* — угол волнового склона, соответствующий максимальному значению левой части. В случае выполнения неравенства (3) дельфин всегда может найти на склоне волны такое положение, при котором $v(\theta_1) \cos \theta_1 = v_0$; $\theta_1 < \theta_*$. Для дельфина, длина которого $L = 2$ м, вес $P = 91$ кг, площадь смоченной поверхности $S = 1.4$ м², коэффициент сопротивления $C_x = 3.5 \cdot 10^{-3}$ с учетом формулы $v_0 = \sigma/k = \sqrt{g/k}$ выражение (3) может быть преобразовано к виду

$$f\left(\frac{\lambda}{L}, \frac{2a}{\lambda}\right) = \frac{4\pi^2 \frac{a}{\lambda}}{\lambda/L [1 + (2\pi a/\lambda)^2]^{3/2}} \geq 0.054,$$

где $\lambda = 2\pi/k$ — длина волны. Графики функции $f = f(\lambda/L, 2a/\lambda)$ представлены на рис. 6. С учетом того, что $L = 2$ м, на указанном рисунке нанесены значения соответствующих длин волн. Пунктирная прямая ($f = 0.054$) отделяет область значений $\lambda, 2a/\lambda$, при которых дельфин может перемещаться с волной (область расположена выше пунктирной линии), от области значений упомянутых параметров, при которых такое перемещение невозможно.

Интересно отметить, что на очень крутых волнах, если они бы могли существовать, дельфин не мог бы двигаться с волной, так как проекция $v_1 = v \cos \theta$ была бы весьма мала вследствие малости $\cos \theta$. При малых отношениях $2a/\lambda$ (очень пологие волны) величина v_1 также меньше v_0 , но уже вследствие малости скорости v . Если дельфин перемещается описанным способом вместе с волной, то его скорость совпадает со скоростью распространения волны, которая связана с длиной волны соотношением $v_0 = 1.25 \sqrt{\lambda}$. Вычисления показывают, что дельфин длиной 2 м при длине волны $\lambda = 9$ м может

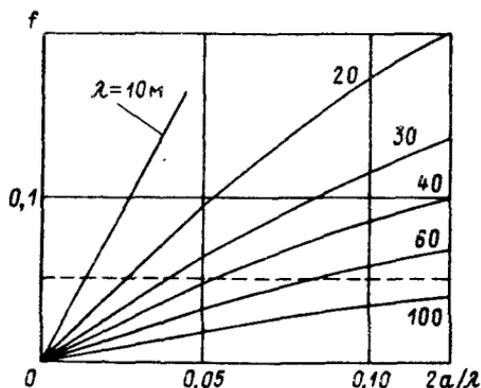
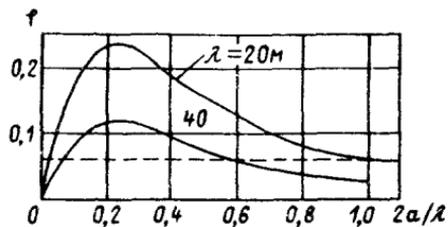


Рис. 6. Графики функции $f(\lambda/L, 2a/\lambda)$, определяющей возможность движения дельфина с бегущей волной

двигаться, не затрачивая энергии, со скоростью $v_1 = 3.75$ м/с, при $\lambda = 25$ м – со скоростью $v_1 = 6.25$ м/с, при $\lambda = 81$ м – со скоростью $v_1 = 11.2$ м/с. В случае, если $\lambda \geq 100$ м, движение дельфина с волной невозможно, поскольку наклон профиля волны к горизонту становится очень малым.

В статье Л.Ф. Козлова и С.А. Довгия [1] сделана попытка распространить результаты работы А.И.Короткина [1] на случай скольжения дельфина на волнах Герстнера. Однако ошибка в определении угла наклона профиля волны Герстнера к горизонту привела к физически невозможным результатам и лишила ценности оригинальную часть работы. Эта же ошибка полностью воспроизведена в монографии Л.Ф. Козлова [3].

Таким образом, способность дельфинов использовать для своего движения гидродинамическое поле давлений вблизи корпуса судна и энергию волновых движений жидкости необходимо учитывать при определении скоростей плавания дельфинов с кораблей и судов в открытом море.

Ко второй группе можно отнести сведения о скоростях плавания специально обученных дельфинов, которые плывут либо за катером в открытом море, либо за приманкой, перемещающейся вблизи поверхности воды. Регулярными тренировками животные приучаются плыть с максимально возможной скоростью.

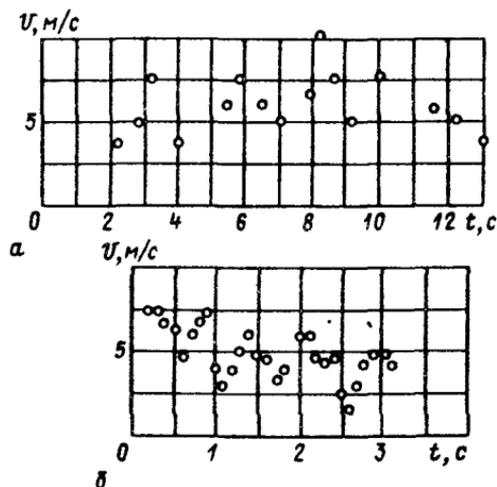


Рис. 7. Экспериментальные данные по замеру скоростей плавания дельфинов

В работе Ж.Я. Грушанской [2] описываются опыты, которые производились с дельфином афалиной на трассе длиной 100 м, оборудованной специальными датчиками, позволяющими фиксировать скорость животного на различных участках движения.

Эксперименты показали, что скорость движения животного изменяется не плавно. Имея периодический характер, она резко колеблется в течение всего времени движения (рис. 7, а). Амплитуды колебаний скорости неодинаковы. Отмеченная во время опытов максимальная скорость составила 11.02 м/с. Она держалась менее секунды, а затем наступило резкое уменьшение скорости. Периодический характер изменения скорости во времени отмечен также и в экспериментах, проведенных другими авторами в бассейне длиной 15 м (рис. 7, б) (Р.Р. Niiler и Н.Ж. White [1]).

Измерения средних скоростей на дистанции 100 м показали, что при движении на достаточно длинном участке для животного наиболее характерными являются средние скорости 5–6,5 м/с. Экспериментальные данные о величинах средней скорости плавания различных дельфинов в зависимости от продолжительности плавания содержатся в работе Л.Ф. Козлова [2]. Там же приводится аппроксимационная формула (выражение (27) на стр. 12) для скорости плавания дельфинов в зависимости от времени плавания. Однако этой формулой пользоваться нельзя, поскольку расчет по ней противоречит исходным данным эксперимента, приведенным на рис. 7–10 упомяну-

той статьи. Указанная ошибочная формула без изменения воспроизведена в книге Л.Ф. Козлова [3] на стр. 131.

2.2. Мощность дельфинов

Существует несколько приближенных способов определения мощности дельфинов. Один из способов основан на предположении, что 1 кг мышц дельфина способен произвести в единицу времени такую же работу, как и 1 кг мышц других млекопитающих, в частности человека. Это допущение дает право при расчете мощности дельфинов пользоваться результатами экспериментов, проводившихся со спортсменами. Данные, приведенные в работе D.R. Wilkie [1], свидетельствуют, что человек при езде на велосипеде может развивать мощность 6 л.с. в течение 1 с, 2 л.с. – в течение 6 с, 1 л.с. – в течение 1 мин, 0,5 л.с. – в течение 5–120 мин, 0,2 л.с. – в течение 24 ч. Чтобы подсчитать удельную мощность мышц человека, можно воспользоваться формулой, предложенной О.Г. Карандеевой, В.А. Протасовым и Н.П. Семеновым для определения веса мышц P , участвующих в совершении работы:

$$P = W n_1 n_2 n_3 n_4,$$

где W – вес человека; $n_1 = 0.4$ – коэффициент, определяющий долю мышц в общем весе; $n_2 = 0.4$ – коэффициент, определяющий долю мышц, участвующих в данном виде движения (например, доля мышц ног при езде на велосипеде); $n_3 = 0.5$ – коэффициент, определяющий долю мышц, участвующих в движении в данный момент (например, при езде на велосипеде – доля мышц одной ноги); $n_4 = 2/3$ – коэффициент, определяющий долю мышц (в приведенном примере доля мышц ноги), участвующих в производстве измеряемой работы. Таким образом, для человека весом 75 кг, едущего на велосипеде, полезный вес мышц при движении составляет 4 кг. Следовательно, удельная мощность мышц человека в зависимости от времени совершаемой работы равна 1.5 л.с. в течение 1 с; 0.5 л.с. – в течение 6 с; 0.25 л.с. – в течение 1 мин; 0.125 л.с. – в течение 5–120 мин, 0.05 л.с. – в течение 24 ч.

Вес мышц дельфина P_0 , участвующих в движении при взмахе хвостового плавника, может быть подсчитан по сходной формуле

$$P_0 = W_0 n_1^0 n_2^0 n_3^0 n_4^0,$$

где W_0 — вес дельфина; $n_1^0 = n_1 = 0.4$; $n_2^0 = 1$, так как практически все мышцы дельфина участвуют в перемещении хвостового плавника; $n_3 = n_3 = 0.5$, так как при взмахе в одном направлении в работе участвует лишь половина мышц; $n_4 = 0.8$ — коэффициент, аналогичный n_4 . Для среднего дельфина длиной $L = 1.8$ м вес равен $W_0 \approx 90$ кг, что позволяет определить $P_0 = 14.4$ кг. Приняв зависимость удельной мощности мышц дельфина такой же, как у человека, получаем мощность дельфина в зависимости от продолжительности совершаемой работы: $N = 21.6$ л.с. в течение 1 с; 7.2 л.с. в течение 6 с; 3.6 л.с. в течение 1 мин; 1.8 л.с. в течение 5–120 мин; 0.72 л.с. в течение 24 ч.

В работах Л.Ф. Козлова [2, 3] предложена формула для расчета мощности млекопитающих, в частности дельфинов, в которую входит общий вес животного, а не вес мышц, участвующих в совершении данной работы. Такое допущение представляется сомнительным, поскольку у различных животных при совершении той или иной работы участвует вполне определенная группа мышц, доля которой в общем весе существенно зависит от вида животного. Особенно важно учитывать это наблюдение при работе со спортсменами, в результате которой получено большинство надежных количественных данных о мощности.

Мощность дельфинов можно оценить по наблюдениям за их прыжками (R.W. Blake [1]). Дельфины выскакивают из воды либо вертикально вверх, либо по наклонной траектории. Они могут совершать прыжки "с места", когда животное почти останавливается носом вверх, а затем, разгоняясь, выпрыгивает из воды. Зная вес животного P и высоту прыжка h , легко определить совершенную при разгоне работу $A = Ph$. Если известно время разгона t , можно подсчитать мощность дельфина $N = A/t$. Американский исследователь T.Lang [1] наблюдал прыжки дельфина весом 180 кг. Двигаясь из состояния покоя, дельфин за 0.7 с развивал скорость, позволявшую ему выпрыгнуть из воды на высоту $h = 1.84$ м. Мощность животного составляла при этом $N = 6.33$ л.с. При таком подсчете не учитывается, конечно, мощность, затраченная дельфином на преодоление сопротивления при движении в воде. Совершенно неверный способ расчета мощности дельфинов по прыжкам предложил С.В. Першин [1].

Параметры прыжка, необходимые для расчета мощности животного, С.В. Першин предлагает определять по кинограмме полета животного в воздухе. Удельная мощность дельфина

\tilde{g} (мощность, отнесенная к весу животного) вычисляется по формуле

$$\tilde{g} = k \frac{h}{t_2},$$

где $k = 1.1$ — коэффициент, учитывающий присоединенную массу тела дельфина, h — максимальная высота подъема центра тяжести дельфина над поверхностью воды, t_2 — время, определяющее длительность полета центра тяжести дельфина от поверхности воды до наивысшего положения в воздухе.

Ошибка в рассуждениях С.В. Першина состоит в неправильном понимании физического смысла времени t_2 , которое отнюдь не представляет собой отрезка времени, за которое дельфин развивает необходимую для прыжка мощность. Элементарные выкладки показывают, что

$$t_2 = \frac{u_0 \sin \alpha}{g}, \quad \tilde{g} = \frac{1}{2} k u_0 \sin \alpha,$$

где u_0 — скорость выхода дельфина из воды, α — начальный угол наклона его траектории к горизонту, g — ускорение силы тяжести. Величина \tilde{g} никакого отношения к удельной мощности дельфина не имеет. Траектория дельфина в воздухе определяется u_0 и углом α . Скорость u_0 характеризует кинетическую энергию дельфина E в момент выхода из воды. Эта кинетическая энергия могла быть накоплена животным в течение длительного движения в воде или резкого броска, иначе говоря в течение различных отрезков времени t . Соответственно и мощность, развитая дельфином при одной и той же скорости выхода u_0 ($N = E/t = A/t$, так как $E \equiv A$), будет различной. Вычислить по киноплёнке, на которую снят прыжок дельфина в воздухе, отрезок времени, соответствующий разгону в воде, невозможно. Поэтому предложенный С.В. Першиным метод расчета мощности дельфина несостоятелен.

Способ расчета мощности дельфина по количеству расходуемого при дыхании кислорода предложен А.З. Колчинской и др. [1]. Зная кислородный эффект дыхательного цикла дельфина афалины (600 мл O_2) и число вдохов-выдохов при движении в течение определенного промежутка времени с определенной скоростью, можно подсчитать мощность животного. Эксперименты показали, что дельфин плыл 15 с со средней скоростью 6 м/с, а затем совершал 2–3 дополнительных дыхательных

цикла. Зная, что на работу в 1 квал уходит 200 мл кислорода, можно подсчитать, что дельфин производил за 15 с работу, равную 2562–3843 кг·м. Таким образом, его средняя мощность при движении со скоростью 6 м/с составляла 2,4 – 3,6 л.с.

2.3. Сопротивление воды движению дельфина

В противоположность хорошо разработанным методам определения сопротивления твердых тел, в настоящее время нет способов непосредственного экспериментального измерения гидродинамического сопротивления живых существ. Поэтому приходится решать эту задачу косвенными методами. Такими методами являются метод измерения сопротивления при скольжении дельфина по инерции и метод "дополнительного сопротивления".

Первый из них состоит в том, что с помощью киносъемки фиксируют процесс движения по инерции специально обученного дельфина на определенном участке акватории (например, дельфин проплывает по инерции через два обруча, расположенных на определенном расстоянии друг от друга). Киносъемка позволяет определить время движения дельфина между обручами и отобрать для расчетов те проплывы, когда животное не производило видимых движений хвостовым плавником. Для вычислений коэффициента сопротивления C_x используют формулу второго закона Ньютона

$$F = - \left(\frac{P}{g} + m_{11} \right) \frac{dv}{dt},$$

где $F = C_x (\rho v^2 / 2) S$ – сила сопротивления воды движению дельфина, P – вес животного, g – ускорение силы тяжести, m_{11} – присоединенная масса воды, S – площадь смоченной поверхности, v – скорость движения дельфина, t – время, ρ – массовая плотность воды. Считая, что C_x во время движения между обручами (из-за уменьшения числа Рейнольдса и нестационарности движения), изменяется незначительно, принимают $C_x = \text{const}$.

Выбрав за характерный линейный размер длину тела дельфина L , за характерную скорость – скорость дельфина v_1 во время пересечения створа первого обруча ($t_1 = 0$), можно привести основное уравнение к безразмерному виду

$$\frac{d\bar{v}}{d\bar{t}} = -k\bar{v}^2,$$

где

$$\bar{v} = \frac{v}{v_1}, \quad \bar{t} = \frac{tv_1}{L}, \quad k = C_x \frac{SL \frac{\rho}{2}}{\frac{P}{g} + m_{11}}.$$

Интегрируя это уравнение при начальном условии $\bar{v}(\bar{t} = 0) = 1$, получаем

$$\frac{1}{\bar{v}} = k\bar{t} + 1. \quad (4)$$

Учитывая, что $\bar{v} = d\bar{x}/d\bar{t}$, где безразмерная координата $\bar{x} = x/L$ отсчитывается вдоль линии скольжения дельфина и изменяется от $\bar{x} = \bar{x}_1$ при $\bar{t} = \bar{t}_1 = 0$ до $\bar{x} = \bar{x}_2$ при прохождении дельфином второго обруча в момент времени $\bar{t} = \bar{t}_2$, получаем на основании (4) уравнение

$$\frac{d\bar{t}}{d\bar{x}} = k\bar{t} + 1,$$

интегрируя которое при указанных условиях, приходим к соотношению

$$e^{k(\bar{x}_2 - \bar{x}_1)} = 1 + k\bar{t}_2. \quad (5)$$

В формуле (5) расстояние между обручами $\bar{x}_2 - \bar{x}_1$ известно, время движения между обручами $t_2 - t_1 = t_2$ ($t_1 = 0$ - начало отсчета времени) и начальная скорость дельфина v_1 определяются по кинограмме, что позволяет вычислить $\bar{t}_2 = t_2 v_1 / L$. Решая уравнение (5) относительно параметра k , нетрудно затем найти величину

$$C_x = 2k \frac{\frac{P}{g} + m_{11}}{\rho SL}.$$

Трансцендентное уравнение (5) имеет в области $k > 0$ один вещественный корень (Ж.Я. Грушанская [1]). Эксперименты, проведенные с использованием скоростной киносъемки (T. G. Lang

и К. Ригор [1]) при числах Рейнольдса $Re = \nu L/\nu = (6.7-9.2) \cdot 10^6$ и $Re = 2.26 \cdot 10^7$, показали, что $C_x = 0.0041$ и $C_x = 0.00396$.

В связи с обсуждением данного метода определения сопротивления дельфина необходимо отметить, что попытки использовать для определения коэффициента сопротивления непосредственно формулу второго закона Ньютона (Б.Н. Семенов [1]) могут приводить к существенным погрешностям, поскольку для получения численного значения ускорения приходится два раза дифференцировать по времени экспериментально получаемую зависимость $x(t)$, где x — продольная координата, определяющая положение дельфина в пространстве.

Второй метод определения сопротивления дельфина — метод "дополнительного сопротивления", основывается на предположении, что хорошо обученный дельфин может развивать одну и ту же максимальную мощность при различных условиях плавания. Придав дельфину дополнительное сопротивление известной величины (обычно надевают кольцо на корпус дельфина), можно тем самым уменьшить скорость плавания животного при сохранении мощности. Экспериментально определив максимальные скорости движения дельфина при свободном плавании и с дополнительным сопротивлением, можно найти исходный коэффициент сопротивления животного. Пусть v_1 — максимальная скорость движения дельфина при свободном плавании, а $N_1 = C_x(\rho v_1^3/2)S$ — соответствующая мощность; v_2 — максимальная скорость движения дельфина с дополнительным сопротивлением; коэффициент дополнительного сопротивления C_x^* определяется экспериментально на жесткой модели животного; S^* — смоченная поверхность дополнительного сопротивления; $N_2 = (C_x + C_x^*)(\rho v_2^3/2)(S + S^*)$ — мощность дельфина при движении с дополнительным сопротивлением. Приравняв выражения для N_1 и N_2 , находим

$$C_x = \frac{C_x^*}{(v_1/v_2)^3 S/(S + S^*) - 1}$$

Эксперименты, проведенные Т. Lang'ом [1] с кольцами различных диаметров, надеваемых на дельфина, позволили ему рассчитать величину $C_x = 0.0042$, что достаточно удовлетворительно согласуется с величинами C_x , определенными первым методом.

Эксперименты, проведенные авторами настоящего обзора с твердыми моделями дельфина и валины, показали, что коэффи-

коэффициент сопротивления при числе $Re = vL/\nu = 10^7$, отнесенный к площади смоченной поверхности, составляет $C_x = 0.00403$ (опыты в аэродинамической трубе) или $C_x = 0.0043$ (опыты в бассейне). Величину смоченной поверхности для трех видов дельфинов можно определить в зависимости от длины животного по данным таблицы 1. Иногда удобно (если известен вес животного, то принимая плотность дельфина примерно равной плотности воды, легко определить объем) относить сопротивление дельфина к его водоизмещению в степени $2/3$. Соответствующие коэффициенты для твердой модели дельфина афалины будут равны $C_x = 0.029$ (аэродинамическая труба), $C_x = 0.031$ (опытовый бассейн).

Сопоставляя приведенные данные по коэффициентам сопротивления дельфинов с коэффициентом сопротивления соответствующей жесткой модели ($C_{x_D} = 0.00396 \div 0.0042$, $C_{x_M} = 0.00403 \div 0.0043$), можно сделать вывод об их практическом равенстве.

Приняв коэффициент сопротивления жесткой модели дельфина, отнесенный к водоизмещению в степени $2/3$ $C_{x_M} = 0.03$, легко рассчитать мощность, необходимую для движения этой модели с разными скоростями. При этом в первом приближении будем считать, что C_{x_M} , определенный при $Re = 10^7$ (для двухметровой модели движение со скоростью $v = 5$ м/с), не меняется в диапазоне $v = (2 \div 12)$ м/с. Это предположение завышает требуемую мощность при буксировке на максимальных скоростях (12 м/с) примерно на 20% и несколько занижает ее на малых скоростях (на 25%). Таким образом, на скоростях $9 \div 12$ м/с для буксировки жесткой модели дельфина потребуется мощность, меньшая расчетной, определяемой по формуле

$$N = 0,03 \frac{\rho v^3}{2} V^{2/3}$$

Если жесткая модель дельфина имеет объем 0.09 м³, что соответствует примерно объему дельфина весом 90 кг, то зависимость N от скорости движения представлена в нижеследующей таблице.

Сравнивая данные этой таблицы с мощностями дельфинов, определенными различными способами ($N = 2.4 \div 3.6$ л.с. при $v = 6$ м/с – по кислородному обмену, $N_D = 6.33$ л.с. – по прыжкам, $N_D = 21.6$ л.с. в течение 1 с, $N_D = 7.2$ л.с. в

v м/с	2	3	4	5	6
N л.с.	0.032	0.108	0.258	0.5	0.866

v м/с	7	8	9	10	11	12
N л.с.	1.37	2.06	2.92	4.14	5.3	6.95

течение 6 с, $N_D = 3.6$ л.с. в течение 1 мин – расчеты по одинаковой удельной мощности дельфина и человека), можно сделать вывод об отсутствии в настоящее время каких-либо оснований, подтверждающих достоверность "парадокса Грея". К подобному выводу приходит T.Y.Wu [2, 3].

Аналогичный вывод применительно к рыбам сформулирован на основе анализа существующих экспериментальных материалов в монографии Н.В. Кокшайского [2].

В связи с задачей определения мощности рыб следует указать на цикл работ, проведенных под руководством В.А. Матюхина [1], а также на статьи Л.Ф. Козлова [1, 2, 4], Б.В. Курбатова и О.П. Овчарова [1]. Интересная идея обсуждается в статье D. Weihs'a [1]. Автор рассматривает возможный способ плавания рыб, имеющих отрицательную плавучесть. Использование избыточной силы веса для получения дополнительной поступательной скорости (своеобразное планирование в толще воды) может обеспечить заметную (до 50%) экономию энергии на движение в заданном направлении. Если рыбы имеют возможность изменять свой объем таким образом, чтобы менять знак своей избыточной плавучести, то и при всплытии возможно использование планирующего эффекта.

При оценках скоростей движения стайных рыб необходимо учитывать эффект взаимодействия отдельных рыб в стае, как полагают авторы проведенного исследования (Akira O., Wataru S., Tadashi I. и Toshiro K. [1]), поскольку совершенно очевидно, что рыбы на переднем фронте стаи все время меняются, испытывая максимальное сопротивление движению, в то время как в центре стаи рыбы движутся в следе впереди плывущих, испытывая заметно меньшее сопротивление.

Определению отдельных геометрических характеристик ластоногих (канала, лысуна и бобра) посвящена работа Ю.Б. Мордвинова и Б.В. Хромовских [1]. Авторы приводят удлинение тел каланов и величину их гидродинамического сопротивления, полученную при опытах с животным на режиме скользящего по инерции движения.

Глава 3

ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ КОЖНЫХ ПОКРОВОВ МОРСКИХ ЖИВОТНЫХ С ПОТОКОМ ЖИДКОСТИ

Значительное количество работ, в которых рассматриваются различные аспекты взаимодействия кожных покровов водных животных с потоком жидкости, связано с предположением, что сопротивление трения обтекаемой поверхности этих животных меньше, чем сопротивление трения аналогичных твердых моделей, движущихся в водной среде с теми же скоростями.

При этом рассматриваются следующие механизмы снижения сопротивления: а) упругие и демпфирующие свойства обтекаемой поверхности; б) бегущие поверхностные волны; в) введение в пограничный слой полимерных веществ; г) образование на обтекаемой поверхности специальных систем элементов шероховатости.

Обсудим кратко каждый из упомянутых способов снижения сопротивления.

3.1. Упругие и демпфирующие свойства поверхности

Идея управления пограничным слоем с целью снижения сопротивления трения при помощи демпфирующих покрытий, расположенных на обтекаемой поверхности, впервые была высказана Крамером в 1957 г. (М. О. Kramer [1]). Представляются возможными два механизма снижения сопротивления трения на податливой поверхности. Первый может быть связан с увеличением длины ламинарного участка пограничного слоя. Второй предполагает взаимодействие развитого турбулентного пограничного слоя (пульсаций нормального и касательного напряжений на стенке) с упругой поверхностью.

Метод расчета критического числа Рейнольдса, определяющего длину ламинарного участка пограничного слоя, а также обзор первых экспериментальных и теоретических работ в этом

направлении содержатся в монографии А.М.Басина, А.И. Короткина и Л.Ф. Козлова [1]. Основные выводы, полученные на основании теоретического исследования устойчивости пограничного слоя на упругой стенке, сводятся к следующему: принципиально возможно увеличить длину ламинарного участка пограничного слоя с помощью упругого покрытия, однако последнее при этом должно обладать специальными вязкоупругими свойствами, которые должны меняться по длине тела и существенно зависеть от скорости движения и глубины, на которой находится тело; небольшие изменения углов атаки и дрейфа (в пределах 1° - 3°), вызывая перераспределение внешнего давления, также приводят к необходимости менять характеристики упругой поверхности. Эксперименты подтверждают возможность затягивания перехода ламинарного пограничного слоя в турбулентное состояние на упругой поверхности. Известные трудности, возникающие при ламинаризации течения на поверхности конкретных объектов (высокие требования к шероховатости и волнистости поверхности, необходимость обеспечения низкого уровня вибрации обшивки и турбулентности набегающего потока), приводят к тому, что даже в условиях специальных экспериментов длина ламинарного участка пограничного слоя на упругой поверхности увеличивается максимум в 2-3 раза. Это означает, что число Рейнольдса Re_L , построенное по продольной координате точки перехода, возрастает от величины примерно $5 \cdot 10^5$ до величины $(1.5 \div 2) \cdot 10^6$. Для технических объектов, движущихся в сплошной среде при $Re_L = UL/\nu = 10^8 \div 10^9$ (L - длина тела), увеличение длины ламинарного участка до величины, соответствующей $Re_{II} = x_{II} U/\nu = 2 \cdot 10^6$ (x_{II} - протяженность ламинарного участка пограничного слоя), не вызовет заметного уменьшения суммарного сопротивления трения.

Задача о взаимодействии турбулентного пограничного слоя с упругой поверхностью по известным причинам не имеет теоретического решения. Поэтому исследования в этом направлении носят эмпирический характер. Эксперименты показывают, что получить выигрыш в сопротивлении при турбулентном режиме течения на упругой поверхности достаточно сложно. Однако некоторым исследователям удавалось уменьшить сопротивление трения с помощью демпфирующих покрытий на 5-10% (P.B.S. Lissaman и G.L. Harris [1], R. Grosskreutz [1]). Краткий обзор последних исследований в этом направлении дали в своих работах M. Gad-El-Hak, R.F. Blackwelder и J.J. Riley [1], D.M. Bushnell, J.N. Hefner и R.L. Ash [1] и В.И. Коробов [1].

Отметим, что идея использовать упругое покрытие для уменьшения сопротивления трению не имеет прямого отношения к объектам живой природы, хотя М.О. Крамер и утверждает, что впервые эта мысль возникла у него при наблюдении за плавающими дельфинами. До настоящего времени нет прямых указаний на то, что животные используют упругие свойства своей поверхности для уменьшения сопротивления трению. Несмотря на это, опубликовано большое количество работ, в которых обсуждаемая гипотеза принимается в качестве истины. Примером может служить обобщающая статья Л.Ф. Козлова и С.В. Першина [1], в которой можно найти ссылки на предшествующие подобные публикации. Авторы упомянутой статьи пишут, что приведенные ими "экспериментальные факты и закономерности убедительно подтверждают свойство кожи китообразных активно регулировать и существенно снижать их "гидродинамическое сопротивление". Между тем, ознакомление с материалом статьи, так же как и с материалами работ, на которые ссылаются ее авторы, не дает оснований для подобных заключений. Приведем лишь два примера из большого числа необоснованных утверждений, использованных в обсуждаемой публикации.

Рассматривая фотографии плавающих дельфинов, где видна цепочка пузырьков воздуха, выходящего из дыхала животных, авторы, опираясь на форму этой цепочки и ее конечную длину, делают совершенно не обоснованные выводы о режимах течения в пограничном слое животных и его отрыве. Траектория цепочки воздушных пузырей зависит от углов атаки и дрейфа, угловых скоростей вращения тела животного, а также от размеров пузырей (скорость вертикального всплытия) и скорости движения животного. Все эти параметры для представленных в статье фотографий не известны. Поэтому на основе их рассмотрения никаких выводов сделать нельзя. Что касается протяженности цепочки пузырей, то она, в первую очередь, зависит от момента, когда дельфин начал стравливать воздух, и, скорее всего, никак не связана с отрывом турбулентного пограничного слоя, о чем ведутся рассуждения в статье.

В качестве второго примера можно привести утверждение, содержащееся в статье, что на жесткой модели дельфина в средней части существует отрыв пограничного слоя. Действительно, судя по уровню пульсаций скорости, это явление имело место на той модели, которая упоминается в статье. Однако указанный отрыв может являться следствием неточностей в изготовлении теоретических чертежей или самой модели, поскольку в экспериментах, проведенных авторами настоящего

обзора на 3-м модели дельфина, изготовленной по теоретическим чертежам, описанным в работе В.Е. Соколова, В.Д. Буракова и Ж.Я. Грушанской [1], не было обнаружено отрывов пограничного слоя на корпусе и выступающих частях. Отмеченное обстоятельство следует учитывать, поскольку наличие отрывов на жесткой модели дельфина существенно используется Л.Ф. Козловым и С.В. Першиным при формулировке заключения об активном влиянии кожных покровов животных на снижение гидродинамического сопротивления. Общий вывод о влиянии упругих покрытий на гидродинамическое сопротивление можно сформулировать следующим образом: а) принципиально возможно уменьшить сопротивление трения в пограничном слое при больших числах Рейнольдса (на теле имеется турбулентный участок пограничного слоя) с помощью специально подобранных демпфирующих покрытий; б) пока нет оснований считать, что у животных существует такой "метод" для снижения сопротивления трения.

3.2. Влияние бегущей волны на сопротивление поверхности

Фотографии поверхности дельфинов при их входе после прыжков в воду и быстром разгоне до максимальной скорости (примеры снимков приведены в монографии Ю.Г. Алеева [2]), демонстрируют наличие на их коже крупных волнистых образований. Эти деформации поверхности послужили для целого ряда авторов основанием обсуждать гипотезу, согласно которой поперечные волны, распространяющиеся по обтекаемой поверхности вдоль течения, снижают гидродинамическое сопротивление. Были опубликованы работы (В.И. Меркулов [1], В.Н. Калугин и В.И. Панчук [1], В.И. Меркулов и Ю.Н. Савченко [1]); посвященные исследованию влияния бегущей волны на характеристики сопротивления обтекаемой поверхности.

Приведем заимствованное из монографии Ю.Г. Алеева [2] описание и трактовку данного явления. Складки, возникающие на поверхности кожи дельфинов, как правило, неподвижны и только у взрослых зверей при самых больших скоростях плавания появляется тенденция к перемещению их вдоль тела по потоку. При остановке дельфина при замедленном движении складки на поверхности кожи, благодаря наличию в ней упругих элементов, исчезают. Существующее мнение, что волны подвижной деформации в коже дельфинов появляются в результате сокращения определенных мышц — туловищных или кожных, не имеет каких-либо экспериментальных подтвержде-

ний. В то же время Ю.Г. Алеевым [2] показано, что у человека, а именно у женщины в возрасте примерно от 17 до 30 лет, совершенно аналогичная подвижная деформация в коже возникает пассивным путем, под действием внешних гидродинамических сил. Следует подчеркнуть, что в пределах торса и конечностей (где наблюдались складки на теле пловчих) у человека нет мышц, которые могли бы двигать кожей. Совершенно очевидно, отмечает Ю.Г. Алеев, что в строении человека нет никаких адаптаций, связанных с приспособлением к плаванию, а между тем, как показывают эксперименты, при плавании наблюдается в принципе совершенно такая же деформация кожного покрова с образованием подвижных волн, какая имеет место на поверхности дельфинов.

Проведенные Ю.Г. Алеевым опыты показали, что деформация поверхности тела, возникающая под действием гидродинамических сил, увеличивает гидродинамическое сопротивление. При буксировке спортсменок в нейтральном костюме, исключающем появление складок кожного покрова, сопротивление оказывалось более низким (на 6%), чем при буксировке в обнаженном виде.

Приведенные данные согласуются с экспериментами авторов данного обзора, проведенными в опытовом бассейне с пластиной, большая часть поверхности которой была изготовлена из упругого материала (пенополиуретан, покрытый приклеенной резиновой пленкой и заполненный водой). При буксировках в диапазоне чисел Рейнольдса $UL/\nu = Re_L = 3 \cdot 10^6 \div 1.5 \cdot 10^7$ (U – скорость буксировки, L – длина пластины) с увеличением скорости на поверхности появлялись поперечные (иногда косые) волны, смещающиеся вниз по потоку. Количество волн и их высота увеличивалась с ростом скорости движения. С момента появления волн на упругой поверхности сопротивление пластины возрастало по сравнению с сопротивлением аналогичной по форме и размерам парафиновой модели.

В связи с изложенным представляется правильным вывод, сформулированный Ю.Г. Алеевым [2]: подвижная деформация поверхности тела не является приспособлением для уменьшения гидродинамического сопротивления, а представляет собой лишь вредный фактор, за счет которого это сопротивление увеличивается.

3.3. Уменьшение сопротивления трения путем введения в пограничный слой высокомолекулярных соединений

Способность некоторых высокомолекулярных соединений снижать гидродинамическое сопротивление тел, движущихся в воде при турбулентном режиме обтекания, широко известна (см. А.С. Гиневский, В.А. Иселевич, А.В. Колесников, Ю.В. Лапин, В.И. Пишпенко и А.И. Секундов [1]). В указанном обзоре содержится описание основных экспериментальных и теоретических результатов, полученных за период с 1948 г. (опубликование известной работы В.А. Томпса [1] до 1978 г. Это сравнительно новое направление гидромеханических исследований развивается независимо от достижений в области бионики. Однако существующее стремление приписать плавающим объектам живой природы высокие гидродинамические качества, в частности низкий коэффициент сопротивления, привело к изучению свойств слизи различных рыб и некоторых морских животных. Примером могут служить публикации (Е.Т. Ускова, В.С. Раевский, Л.И. Момот и И.А. Усков [1], Е.Т. Ускова, А.И. Шмырев, В.С. Раевский, Л.Н. Богданова, Л.Н. Момот, В.В. Беляев и И.А. Усков [1], в которых приводятся данные по сравнительной эффективности полиоксиэтилена марки WSR-301 и кожных выделений ряда черноморских рыб (смарида, ставрида, звездочета, морского ерша, горбыля, ласкаря), а также глазных выделений дельфина (морской свиньи). В упомянутых работах сделан вывод, что слизистое покрытие ставриды и раствор слезных выделений морской свиньи являются эффективным средством снижения гидродинамического сопротивления. Интересные данные по изучению слизи различных рыб содержатся в книге Н.В. Кокшайского [2] и в статьях А.С. Васильева, А.Ф. Ильичева, Е.Д. Казберука и А.Б. Цинобера [1], J.W. Ноут'a [1].

3.4. Образование на обтекаемой поверхности специальных систем элементов шероховатости

Наличие на поверхности большинства рыб сложного микро-рельефа в виде разнообразных чешуек, выступов и впадин вызвало появление многочисленных работ, в которых делаются попытки обосновать целесообразность этих элементов шероховатости с точки зрения гидродинамики внешнего обтекания. В качестве примера можно указать работы В.Д. Бурдак [1] и А.П. Коваля [1], в которых содержатся ссылки на предыдущие

публикации по этому разделу бионики. Несмотря на подробную обоснованную критику работ В.Д. Бурдак (Н.В. Кокшайский [2]), в которых содержится утверждение, что шероховатость кожных покровов рыб приводит к ламинаризации пограничного слоя и уменьшению сопротивления трения, эта точка зрения продолжает встречаться в бионической литературе. В монографии Ю.Г. Алеева [2] со ссылкой на многочисленные работы В.Д. Бурдак утверждается, что детали рельефа кожных покровов рыб "представляют собой элементы ламинаризатора и направлены на уменьшение или ликвидацию турбулентных пульсаций в пограничном слое". Существующие исследования по управлению пограничным слоем с целью ламинаризации (А.М.Басин, А.И. Короткин и Л.Ф. Козлов [1]) свидетельствуют об обратном. Любая по форме шероховатость поверхности, являясь источником возмущений, ускоряет переход ламинарного пограничного слоя в турбулентное состояние. Определяющими факторами при этом являются относительная высота элемента шероховатости и число Рейнольдса.

Представляют интерес данные, которые опубликовал M. Walsh [1]. Результаты экспериментов с пластинами с нанесенными на них поперечными v -пазами или продольными ребрами (высота пазов и ребер составляла величину порядка 0,01 толщины пограничного слоя пластины) показали снижение общего сопротивления на 7-8% по сравнению с плоской пластиной. Выяснение причин этого явления является целью и предметом последующих исследований.

В связи с вопросом о возможности уменьшения сопротивления тела путем нанесения на его поверхность элементов шероховатости специальной формы целесообразно отметить следующие два обстоятельства. Если на поверхности тела при его обтекании потоком жидкости имеется отрыв пограничного слоя, то с помощью искусственной шероховатости можно затянуть отрыв (уменьшить застойную зону) или вообще его ликвидировать. Сопротивление тела при этом уменьшится. Если числа Рейнольдса не очень велики и отрывается ламинарный пограничный слой, то достаточно в нужном месте на поверхности тела поместить турбулизатор в виде проволоки либо системы штифтов. Пограничный слой турбулизуется, профиль скоростей в пристеночной области заметно приполнится и точка отрыва сдвинется вниз по потоку. Если числа Рейнольдса таковы, что течение в пограничном слое переходит в турбулентное состояние до точки отрыва, то затянуть отрыв (или ликвидировать его полностью) можно с помощью специально спрфилирован-

ных элементов шероховатости – вихрегенераторов, располагаемых в предотрывной области пограничного слоя (P.K.Chang [1]). Вихрегенераторы создают систему продольных вихрей, которые перемешивают пристеночные слои жидкости, приполняют профиль скоростей у стенки, благодаря чему пограничный слой оказывается способным преодолеть более сильные положительные градиенты давления. Точка отрыва смещается вниз по потоку. Высказанные соображения в аэрогидромеханике давно известны и используются в практических приложениях. Бионика в развитие данного направления пока ничего нового не внесла.

Применительно к рыбам возможный интерес представляет вопрос о воздействии поверхности вихрегенераторов на отрыв нестационарного ламинарного и турбулентного пограничных слоев. При работе хвостового плавника обтекание его элементов носит нестационарный характер. Возможно, что системы продольных вихрей, генерируемые элементами кожного покрова рыб, позволяют обеспечивать большие местные углы атаки в безотрывном режиме обтекания, что повышает качество, а следовательно, и коэффициент полезного действия движителя. Ясно, что проверку высказанной гипотезы следует производить на какой-либо установке типа "машущее крыло".

В связи с обсуждением влияния шероховатости поверхности животных на их гидродинамическое сопротивление следует отметить работу Н.В. Кокшайского, Ж.Я. Грушанской и Л.А. Чекаловой [1], посвященную экспериментальному изучению характеристик турбулентного течения воды в круглой трубе, внутренние стенки которой были покрыты мехом водных животных.

В результате проведенных опытов авторы нашли, что мех морского котика в качестве пассивного покрытия на внутренней поверхности трубопровода существенно повышает коэффициент его гидродинамического сопротивления. Однако при этом следует учитывать, что в экспериментах использовалась грубо выделенная шкура морского котика, по своим свойствам сильно отличающаяся от меха живого животного. Волосной покров животного, где мех – крайне своеобразная поверхность, настолько отличающаяся от привычных в технике поверхностей, что ее изучение может привести к неожиданностям. Знание гидродинамических характеристик меха представляет несомненный интерес.

ДВИЖИТЕЛИ ВОДНЫХ ЖИВОТНЫХ *

Под движителем, как обычно, понимается устройство технического объекта или часть тела живого организма, на котором непосредственно возникает сила, приводящая в движение рассматриваемую систему. Применительно к миру животных, движущихся в сплошной среде, можно выделить несколько типов движителей (T.Y. Wu [4]). При малых числах Рейнольдса ($Re < 1$) широкое распространение в природе получили движители в виде жгутиков и колеблющихся ресничек. Описание работы этих движителей и обзор соответствующих исследований применительно к движению микроорганизмов содержится в монографии Н.В. Кокшайского [2], а также в работах O. Pigonleau и D.F. Katz'a [1], С.В. Першина [7], Г.А. Остроумова и Л.Н. Серавина [1]. При больших числах Рейнольдса ($Re > 10^4$), представляющих наибольший интерес для технических приложений, живые организмы используют волновой движитель (ундуляционное плавание), плавниковый движитель (хвостовой плавник), гидрореактивный движитель. Указанные три последних типа движителей известны давно. Живая природа наверняка послужила источником основных идей, реализованных в технических воплощениях обсуждаемых движителей. Однако современная бионика мало что дала для практических приложений, где основным движителем является гребной винт, условия работы которого не имеют аналогов в живой природе (подобно колесу во всех транспортных средствах).

Поэтому изучение движителей живых существ имеет, главным образом, вспомогательное значение, поскольку, рассчитав его коэффициент полезного действия и замерив кинематические характеристики движения объекта, можно определить полезную тягу, а следовательно, и сопротивление воды. Таким образом поступает, в частности, Л.Ф. Козлов [1] при расчете гидродинамического сопротивления быстроплавающих рыб.

Ближе всего к техническим приложениям после гребного винта располагается плавниковый движитель, с которого и целесообразно начать обзор соответствующих работ.

* Настоящий раздел написан В.К. Ефремовым совместно с А.И. Короткиным.

Под плавниковым движителем обычно понимается крыло, совершающее периодические колебательные движения в жидкости и создающее при этом тягу в заданном направлении. Расчетные методы определения сил и моментов, возникающих на крыле при его нестационарном движении в несжимаемой жидкости, хорошо развиты и изложены в известных монографиях Л.И. Седова [1], В.В. Голубева [1], А.И. Некрасова [1], Н.Н. Поляхова [1], С.М. Белоцерковского, Б.К. Скрипача и В.Г. Табачникова [1]. Однако при расчетах конкретного плавникового движителя, рабочий орган которого представляет собой крыло конечного удлинения с профилем определенной толщины, движущееся вблизи корпуса основного объекта, возникает целый ряд задач, требующих дополнительных теоретических и экспериментальных исследований.

Прежде всего встает вопрос об оптимальном законе перемещения крыла как по поперечной, так и по угловой координатам в зависимости от скорости набегающего потока (скорости поступательного движения объекта). Оптимум можно понимать различно, в зависимости от поставленной задачи: достижение максимального тянущего усилия или получение наивысшего к.п.д., под которым понимается отношение средней мощности, затрачиваемой на создание тяги, к мощности, расходуемой на колебание профиля. При этом необходимо учитывать особенности конструкции движителя, ограничивающие, как правило, частоты колебаний и амплитуды поперечных и угловых перемещений крыла. В связи с разработкой оптимальных траекторий крыла определенный интерес представляют экспериментальные исследования кинематики различных режимов движения живых объектов, использующих хвостовой плавник в качестве основного движителя (Ю.Н. Савченко и В.Т. Савченко [1]).

Результаты измерений кинематических характеристик плавающих дельфинов содержатся в работах В.Е. Пятецкого и В.П. Каяна [1, 2], В.Е. Пятецкого, В.П. Каяна и А.М. Кравченко [1], Н.П. Семенова, В.В. Бабенко и В.П. Каяна [1], Н. Susumo [1], Р.Р. Niiler'a и Н. J. White [1], В.П. Каяна, Л.Ф. Козлова и В.Е. Пятецкого [1], В.П. Каяна и В.Е. Пятецкого [1]. Наиболее обстоятельной является последняя статья. Ее авторы приводят результаты экспериментов с шестью дельфинами афалинами, длина которых L менялась в пределах 2,35 – 2,65 м (В.П. Каян и В.Е. Пятецкий [3]).

Опыты проводились в специальном канале (В.Е. Пятецкий, В.П. Каян, Л.Ф. Козлов и Н.П. Семенов [1]), одна из боковых стенок которого была застеклена на участке в несколько длин дельфина. Регистрация процесса плавания дельфинов производилась киноаппаратом со скоростью съемки 30–40 кадров в секунду. Для обработки отбирались режимы, при которых наблюдались регулярные колебания хвостовой части дельфина, а траектория движения примерного центра тяжести животного была близка к горизонтальной прямой линии. Вследствие отмечавшейся уже нестационарности поступательного движения дельфина все кинематические параметры его плавания определялись как осредненные за один период колебаний хвостового плавника.

По перемещению центра тяжести дельфина на кадрах киноплёнки за промежуток времени Δt вычислялась скорость плавания v и строилась зависимость $v = v(t)$. По этим графикам находились осредненные за период колебаний хвостового плавника значения \bar{v} и ускорение. Все полученные с графиков значения частоты колебаний f и амплитуды колебаний развилки хвостового плавника A_0 разделялись на группы в зависимости от величины и знака продольного ускорения дельфина. В статье приводятся экспериментальные зависимости $f = f(\bar{v}/L)$, $A_0/L = \varphi_1(\bar{v}/L)$, $Sh = Sh(Re)$, где $Sh = A_0 f / \bar{v}$, $Re = \bar{v}L/\nu$, $A_0/l = \varphi_2(\bar{v}/L)$, $\bar{v}/c = \varphi_3(\bar{v}/L)$, где $l = 2\pi/\lambda$, λ – длина локомоторной волны, бегущей по телу, c – скорость распространения локомоторной волны по телу дельфина. Величины λ и c определялись для каждого режима на кинограммах. Эксперименты проводились в диапазоне $4 \cdot 10^6 < Re < 14 \cdot 10^6$.

Обсуждаемые экспериментальные данные безусловно представляют определенный интерес, однако значительный разброс опытных точек не позволяет достаточно надежно выявить характер указанных выше зависимостей. Кроме того, для животных столь значительных размеров возможно влияние на их характер движения ограниченности поперечных размеров канала. С точки зрения приложения к плавниковым движителям наибольший интерес представляет форма траектории хвостового плавника и углы атаки этого плавника по отношению к набегающему потоку в каждой точке траектории. Подобные данные можно было бы, вероятно, получить при анализе конкретных кинограмм, которые, к сожалению, в упомянутых работах отсутствуют.

Кинематические характеристики процесса плавания нескольких видов рыб (пелагида, кефаль, луфарь, черноморский сарган) приводятся в работах В.Е. Пятецкого и В.П. Каяна [1,2].

Опыты проводились на специальной биогиродинамической установке (В.П. Каян и В.Е. Пятецкий [1]). Кинематика плавания рыб фиксировалась с помощью киносъемки. В указанных работах приводятся траектории хвостовых плавников рыб при различных скоростях поступательного движения, зависимости частоты колебаний хвостового плавника от скорости плавания, зависимости пути, проходимого рыбой за один период колебаний ее хвостового плавника. Обращает на себя внимание линейный характер зависимости частоты колебаний плавника от скорости движения рыбы в диапазоне скоростей от 0,2 до 1,5 м/с. Разброс экспериментальных точек на графиках значительно меньший, чем в случае опытов с дельфинами. Отсутствие фактических кинограмм плавания рыб существенно затрудняет использование результатов проведенных экспериментов для выбора режимов работы плавникового движителя в технических приложениях.

В связи с обсуждением кинематических характеристик плавания дельфинов отметим статью С.В. Першина [4], который на основе экспериментальных данных, полученных А.Ф. Купряшовым и Н.П. Семеновым в кольцевом бассейне (диаметр 38 м, ширина кольца воды 2 м), построил зависимости амплитуды колебаний хвостового плавника морской свиньи и белобочки от частоты колебаний. Кривые указанных зависимостей имели максимум в районе частоты колебаний $f = 1,5$ Гц. Сам факт наличия максимума на кривой $A = A(f)$ вполне возможен, поскольку изменять тягу дельфин может как за счет увеличения A при постоянной частоте, так и за счет увеличения f при постоянной амплитуде. Вопрос об оптимальном соотношении A и f "решается" животным, вероятно, в соответствии со скоростью движения и окружающей обстановкой. В упомянутой статье режим, при котором A достигает максимума, называется "резонансным", что представляется необоснованным, поскольку общепринятое понятие резонанса не имеет ничего общего с обсуждаемым явлением, возможно имеющим место при плавании дельфина. Можно указать также на то обстоятельство, что данные по кинематическим параметрам движения дельфинов афалин, приводимые в цитированных работах В.П. Каяна и В.Е. Пятецкого, не дают определенных указаний на наличие экстремума в зависимости $A = A(f)$. Подобный максимум не наблюдается и на аналогичных кривых, построенных по результатам экспериментов с рыбами.

Подводя итог приведенному краткому обзору работ по изучению кинематических характеристик рыб и дельфинов, прихо-

дится констатировать, что для разработки кинематики движения технических плавниковых движителей бионики пока ничего нового не дали, кроме общей идеи о том, что с помощью нестационарного периодического движения крыла можно создавать тягу.

Поэтому конструкторы плавниковых движителей идут обычным "техническим" путем: создают экспериментальные установки, у которых крыло имеет одну или две степени свободы (поперечные перемещения и поворот вокруг поперечной оси, лежащей в плоскости крыла), и проводят систематические эксперименты, подбирая оптимальные соотношения кинематических параметров, позволяющие получить необходимую тягу и обеспечивающие удовлетворительный к.п.д.

Рассмотрим кратко работы, опубликованные по этому направлению. Результаты экспериментов по изучению сил и моментов, возникающих на жестком прямоугольном крыле, совершающем в жидкости угловые и поперечные колебания, приводятся в статьях В.П. Каяна [1, 2]. С.А. Довгия и В.П. Каяна [1], Э.П. Гребешева и О.А. Сагояна [1]. Н. Hertel'a [1].

Опыты В.П. Каяна проводились в гидрлотке с размерами поперечного сечения $0,42 \times 0,62$ м при скоростях водяного потока от нуля до $0,67$ м/с. Крыло с хордой $b = 0,14$ м и размахом $l = 0,42$ м располагалось под свободной поверхностью на глубине $h = 1,4 b$. Величина амплитуды поперечных колебаний крыла составляла $0,06$ и $0,1$ м, угловая амплитуда изменялась от 0° до 18° . Частоты колебаний крыла варьировались от 1 до $2,5$ Гц. С помощью тензодатчиков измерялись горизонтальная и вертикальная составляющие гидродинамической силы. Результаты измерений упора, развиваемого крылом при колебаниях, существенно зависят от амплитуд поперечных и угловых колебаний, а также от сдвига фаз между ними.

В работе С.А. Довгия и В.П. Каяна приведено сравнение экспериментальных данных по силе тяги колеблющегося крыла с результатами расчетов на основе гипотезы квазистационарности. Установлено, что при малых относительных поступях крыла $L_p = v/A\omega < 1,3$ (v — горизонтальная скорость движения крыла, A — амплитуда поперечных колебаний, ω — частота колебаний) эксперимент дает существенно большие величины тяги, чем расчет. Сдвиги фаз между перемещениями передней и задней кромок крыла равнялись 18° и 36° . Э.П. Гребешов и О.А. Сагоян исследовали гидродинамические характеристики колеблющегося крыла, выполняющего функции не-

сущего элемента и движителя. Крыло совершало поступательно-крутильные колебания около некоторого среднего угла атаки. Установлено, что сила тяги крыла максимальна, если крутильные колебания опережают поступательные на угол 90° . Средний угол атаки крыла оказывает заметное влияние на его тягу. Увеличение среднего угла атаки ведет к существенному уменьшению силы тяги (вплоть до изменения ее на силу сопротивления). При этом уменьшается к.п.д. машущего крыла.

Результаты экспериментального исследования силы тяги, создаваемой одним крылом и системой из двух крыльев, совершающих крутильные колебания, приведены в работе Д.Н. Горелова [1]. Опыты проводились в бассейне. Два симметричных крыла с хордой $b = 0,25$ м и размахом $l = 0,57$ м размещались под днищем плоскодонной лодки параллельно поверхности воды на расстоянии от днища $h = 0,1$ м. Задняя кромка первого крыла находилась от носика второго на расстоянии, равном $0,2 b$. Частоты колебаний крыльев менялись от 3,1 до 16 Гц, скорость буксировки варьировалась от нуля до 1,5 м/с. Эксперименты показали, что суммарная сила тяги системы из двух крыльев зависит от отношения амплитуды колебаний и сдвига фаз между ними. При малых значениях отношения амплитуд мало гидродинамическое взаимодействие между крыльями. В частности, при колебаниях второго крыла в присутствии неподвижного первого система крыльев развивает практически ту же тягу, что и при колебаниях одного крыла. Гидродинамическое взаимодействие крыльев растет с приближением отношения амплитуд к единице. При этом максимальная тяга достигается при сдвиге фаз между колебаниями крыльев в 270° . Она практически совпадает с тягой, развиваемой двумя изолированными крыльями.

Соотношения между крутильными и поперечными колебаниями плоского крыла, обеспечивающие получение максимального к.п.д. или максимальной тяги, рассматриваются в работах Д.Н. Горелова [1] и Ю.Н. Савченко [1].

4.2. Волновой движитель

Под волновым движителем обычно понимают тело, деформирующееся по закону поперечной бегущей волны, распространяющейся от передней кромки тела к задней со скоростью, большей скорости поступательного перемещения тела в жидкости. Приближенные теоретические методы расчета характеристик волновых движителей как в случае изгибных колебаний тонкого

тела, так и в случае поперечных колебаний пластины развиты в работах Г.В. Логвиновича [1, 2, 3], М. J. Lighthill'a [2, 3, 4], Т.У. Wu [1, 2, 3], М.А. Ильгамова, М.М. Сулеймановой, В.М. Талдыкина и В.Л. Федяева [1]. Упрощенный метод расчета тяги пластины малого удлинения, совершающей изгибные поперечные колебания в потоке жидкости, изложен в работе Л.И. Коренной [2]. Изгибающаяся пластина заменяется системой вихревых "рамок", которые на каждой четверти волны имеют свою интенсивность и определенное положение в пространстве. Правомочность подобной замены основана на экспериментальных данных по визуализации течения Ю.Г. Алеева, и О.П. Овчарова [1], S. Taneda и Y. Tomonari [1].

С целью проверки различных теоретических схем, описывающих работу волнового движителя, необходимо проведение соответствующих экспериментов. Интересные экспериментальные данные по величинам силы тяги, развиваемой волновым движителем, содержатся в работе Л.И. Коренной [1]. Эксперименты проводились в воде на пластине длиной $l = 0.477$ м, шириной 0.102 м, толщиной 3 мм, изготовленной из резины с завулканизированными ребрами жесткости, к которым крепились тяги, создававшие бегущую волну. Тензометрические датчики стояли на каждой из тяг и пружине, крепящей всю установку к основанию, что позволяло измерять общую силу тяги. Закон деформации пластинки задавался в виде

$$y = A(x) \sin(\omega t + \alpha x),$$

где $A(x)$ - амплитуда колебаний, изменяющаяся по продольной координате, x , $\alpha = 2\pi/\lambda$, λ - длина волны, $\omega = 2\pi f$, f - частота колебаний в герцах. Длина волны выбиралась так, что число волн n , укладываемых на длине пластинки l , составляло $1/4, 1/2, 3/4, 1$. Частота колебаний изменялась в пределах $1.5 \text{ Гц} \leq f \leq 4 \text{ Гц}$. Скорость движения воды в гидрлотке варьировалась от нуля до 1.1 м/с. В статье приводятся данные для $n = 3/4$ при изменении $A(x)$ по законам

$$A(x/l) = 0.15 \pm 0.031 x/l,$$

$$A(x/l) = 0.0115 + 0.021 x/l + 0.017 (x/l)^2,$$

использованным в работе Н.Р. Kelly, А.В. Rentz'a и J. Sieckmann'a [1]. Полученные в обеих работах зависимости коэф-

коэффициента силы тяги от числа Струхала $Sh = fl/V$ качественно совпадают. Данные опытов Л.И. Коренной дают более высокие значения коэффициента тяги. С увеличением частоты и амплитуды колебаний сила тяги увеличивается. Заметное увеличение силы тяги можно получить, если амплитуда колебаний возрастает к хвостовой части пластинки.

У морских животных и рыб хвостовой плавник как движитель несет в себе черты плавникового и волнового движителя, поскольку хвостовая часть тела плывущего животного и сам плавник в процессе движения деформируются (Е.Д. Сорокодум [1]). Кинограмма плывущего дельфина азовки, приведенная в монографии Н.В. Кокшайского [2], дает представление о сложном характере движения хвостового плавника, который не только перемещается в поперечном направлении, вращаясь вокруг поперечной оси как твердое тело, но и изменяет свою форму. Последнее обстоятельство существенно отличает работу хвостовых плавников дельфинов и рыб от жесткого крыла плавникового движителя. Изменение формы средней линии сечений хвостового плавника в процессе движения в определенной мере сближает его с волновым движителем. Кроме того, при движении хвостового плавника дельфина, например вниз, концы плавника под действием гидродинамической нагрузки отгибаются кверху и наоборот, точно так же, как это наблюдается на крыльях летящих птиц. Влияние указанных деформаций машущих крыльевых систем животных на гидродинамические характеристики полностью не выяснено. Поэтому делать вывод о целесообразности их копирования в технических приложениях пока преждевременно. Однако можно указать на широкое распространение различных ласт, которые применяются пловцами в парном варианте (ласт крепится на каждую ногу) и в виде моноласта, когда тело пловца, совершая волнообразные движения, передает соответствующие колебания одному гибкому искусственному плавнику. В работе Р.А. Грунтфеста и Н.П. Дерезиной [1] теоретически рассматривается в линейной постановке задача о колебаниях упругого лапа в потоке жидкости. Приводятся формулы и результаты расчетов тяги лапа и к.п.д. в зависимости от приведенной частоты колебаний. Рассматриваются условия оптимизации работы лапа за счет выбора кинематических характеристик движения, а также за счет подбора параметров лапа (длины, распределения упругости). Предложенная методика расчета применима для ласт большого удлинения, поскольку основана на двумерной теории. Подобную задачу в случае колебания гибкого крыла с

большой амплитудой исследуют J. Katz и D. Weihs [1], Н. К. Cheng и L. E. Murillo [1]. В связи с вопросом об упругих свойствах плавников китообразных следует отметить гипотезу С. В. Першина, А. С. Соколова и А. Г. Томилина [1] о возможности регулирования животными этих свойств плавников в зависимости от режима плавания.

4.3. Гидрореактивный движитель

Целая группа морских животных используют для своего движения в водной среде пульсирующий гидрореактивный движитель. Принцип реактивного движения давно известен и широко применяется в технике. Правомерно, в связи с этим, поставить вопрос: существуют ли какие-либо особенности реактивного движения морских животных, которые целесообразно было бы использовать в технике? В настоящее время нельзя дать на указанный вопрос положительного ответа, поскольку существующие исследования пульсирующего гидрореактивного движителя (А. П. Макаров и И. М. Черный [1], В. А. Григорьев, В. М. Ивченко и А. П. Кулак [1], С. Б. Осипенко, Ю. Н. Савченко и И. М. Черный [1]; И. М. Черный и В. С. Сивый [1]) показывают весьма низкую эффективность его по сравнению с обычными гребными винтами (А. А. Русецкий, М. М. Жученко и О. В. Дубровин [1]; А. А. Русецкий [1]) и водометными движителями (С. В. Куликов и М. Ф. Храпкин [1]). Главная причина отмеченного обстоятельства кроется в нестационарном характере забора и выброса воды. Увеличивая число циклов работы пульсирующего движителя в единицу времени, можно в пределе получить обычный водометный движитель с соответствующими пропульсивными качествами. В живой природе отсутствует возможность обеспечения непрерывной работы реактивного движителя (в технических водометах стоят обычные гребные винты, приспособленные для работы в ограниченном пространстве), поэтому возникает нестационарный режим работы со всеми вытекающими отсюда последствиями.

Фактически данные о параметрах реактивной струи, изменении тяги и давления в мантийной полости головоногого моллюска можно найти в работе J. A. Chamberlain'a [1].

Определенный интерес представляют примерные значения к. п. д. η для различного типа движителей: гребной винт $\eta = 0.7 \div 0.8$, водометный движитель $\eta = 0.5 \div 0.65$; плавниковый движитель $\eta = 0.5 \div 0.6$; волновой движитель $\eta =$

= 0,1 ÷ 0,2. В технических приложениях используются еще крыльчатые движители и гребные колеса. По своему принципу работы и к.п.д. они близки к плавниковому движителю, однако в кинематике их движения существенно используется непрерывное вращение основной конструкции, на которой закреплены несущие элементы — крылья или лопасти.

При обсуждении целесообразности использования того или иного типа движителя в технических приложениях необходимо учитывать возможность обеспечения этим движителем заднего хода. Морские животные и рыбы, как правило, не перемещаются хвостом вперед, поскольку их маневренные характеристики исключительно высоки по сравнению с аналогичными характеристиками технических объектов. Для судов и других плавающих средств режим реверса является одним из важных элементов управляемости. Для всех технических движителей (винт, водомет, крыльчатый, гребное колесо) задний ход обеспечивается сравнительно просто, в то время, как движители живых существ (плавниковый, волновой, гидрореактивный) не приспособлены для создания тяги в обратном направлении.

В заключение настоящего раздела необходимо отметить, что, несмотря на целый ряд трудностей, плавниковый движитель пользуется в настоящее время пристальным вниманием не только специалистов гидромехаников, но и конструкторов. Фирма Wave Control Co. (Норвегия) разрабатывает проект плавниковых движителей (E. Jakobsen [1]). Полученные на моделях результаты и расчеты показывают, что натурное судно длиной 45 м с плавниковым движителем сможет развивать скорость до 15 узлов и к.п.д. движителя будет не меньше, чем у гребного винта. Автор считает, что уже в настоящее время целесообразно применять плавниковые движители на спортивных, спасательных и буксирных судах. Аналогичные разработки ведутся в США (O. Laser [1]), Японии (X. Морикава [1]) и ФРГ (W. Voß [1]).

При разработке плавниковых и волновых движителей для судов, перемещающихся вблизи свободной поверхности воды, существует принципиальная возможность использования энергии ветровых волн для создания дополнительной тяги (T. Y. Wu и A. T. Chwang [1]).

АЭРОДИНАМИКА ПОЛЕТА ПТИЦ

В данном разделе рассматриваются вопросы аэродинамики полета птиц, имеющие отношение к аэродинамике летающих технических объектов и, как исключение, один вопрос, касающийся эволюции птиц, происхождения полета как способа передвижения.

В связи с непрерывно возрастающей за последнее время необходимостью экономии топлива все больше усиливается интерес к различным методам снижения сопротивления летательных аппаратов, имеющих достаточно большие несущие поверхности. Многообещающей с этой точки зрения является задача уменьшения аэродинамического сопротивления, в частности одной из его составляющих – индуктивного сопротивления, которое для большинства летательных аппаратов составляет примерно 30% от общего сопротивления на крейсерском режиме и еще больше – при меньших скоростях, например в процессе взлета. В этом плане весьма полезным оказалось изучение строения и работы крыльев птиц. Внешние перья крупных птиц разрезаны и образуют как бы "отдельные" крылья на концах основного. Разрезное крыло состоит из 6–7 длинных узких перьев, которые можно рассматривать как самостоятельные и удлинение которых велико. Кроме того, благодаря подпору воздуха снизу и создаваемой нагрузке эти перья изгибаются кверху. Образующиеся при этом напряжения вызывают появление кривизны пера. Такие выпукло изогнутые перья создают большую подъемную силу, чем плоские. Расположенное у передней кромки крыла перо выгнуто сильнее чем второе, соседнее; второе – сильнее, чем третье, и т.д. Соответствующая выпуклость крыла достигается автоматически благодаря упругой деформации под воздушной нагрузкой, а не благодаря активному управлению птицей перьями. Это, говоря языком техники, автоматическое управление геометрией крыла. Изогнутые кверху перья отводят поток воздуха от середины крыла, не допуская перетекания воздуха с кончика крыла на верхнюю поверхность. Идея использования подобного строения птичьего крыла как крыла с разрезными торцами породила как один из способов снижения индуктивного сопротивления установку на торцах крыльев подвижных законцовок – "флюгеров" или "пальцев" различной конструкции. Эти концевые

пластинки — “флогеры” на торцах крыльев самолетов могут быть уподоблены перьям на концах птичьих крыльев. Серьезную работу по изучению строения крыльев птиц и испытаниям жестких изолированных крыльев, в той или иной степени повторяющих их геометрические особенности, провел E. F. Blick [1]. В аэродинамической трубе университета в Оклахоме (США) были проведены эксперименты с деревянной моделью крыла с плоским торцом и крыла с торцом, модифицированным “под разрезное перо”. В результате опытов была определена завихренность за плоским торцом, угловая скорость которой равна примерно 1500 рад/с, а за разрезным торцом — в 7 с небольшим раз меньше, только 200 рад/с. Иначе говоря, налицо разрушение концевого вихря, пусть даже не полное, стекающего с торца крыла, на котором установлены пластинки — “флогеры”, имитирующие концевые перья крыльев птиц.

Кроме уменьшения индуктивного сопротивления, с помощью размещения на торцах подвижных пластин может быть решена проблема борьбы с мощными крупными вихрями, стекающими с крыльев больших самолетов. Эти невидимые вихри, очевидно, сохраняются в следе за самолетом на расстоянии многих километров и представляют опасность для мелких самолетов, которые, проходя через этот сверхдальний вихревой след, могут потерять управление. Испытания, проведенные в Эдвардском Испытательном центре NASA, показали, что двухмоторный самолет Learjet, попав в торцевые вихри примерно в 6 км за транспортным самолетом C-5, шедшем на посадку с опущенными закрылками, перевернулся “на спину”. За период с 1964 по 1969 гг. по такой же причине в США произошло по меньшей мере 98 аварий, унесших жизни 20 человек и ранивших 54. Разрезные гибкие торцы крыльев крупных самолетов позволят значительно снизить интенсивность вихревого следа на расстоянии нескольких километров за самолетом. Так, есть данные, свидетельствующие, что на расстоянии 1,7 хорды за крылом интенсивность этих вихрей падает в 7 раз.

Конструкция этих торцевых пластин — “флогеров” может быть, очевидно, различной. Так, в Париже на выставке в Бурже в 1977 г. демонстрировалась модель самолета, предложенного NASA, с трапециевидными крыльями большого удлинения, плавно переходящими каждое в три, по всей видимости, профилированных длинных “пальца” (рис. 8). Эффективное удлинение крыльев этого самолета, и без того достаточно боль-

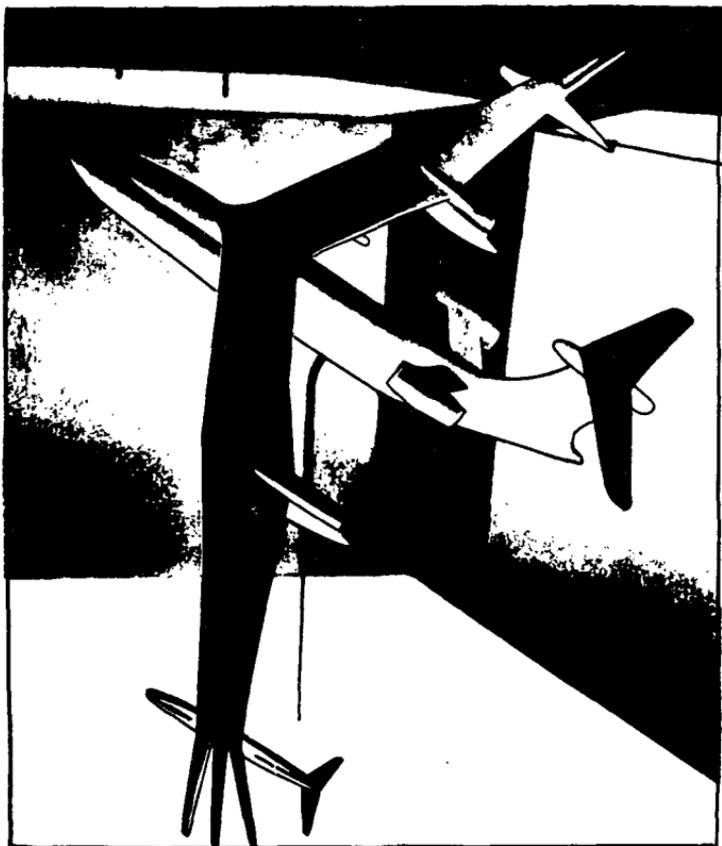


Рис. 8. Модель самолета с разрезными крыльями

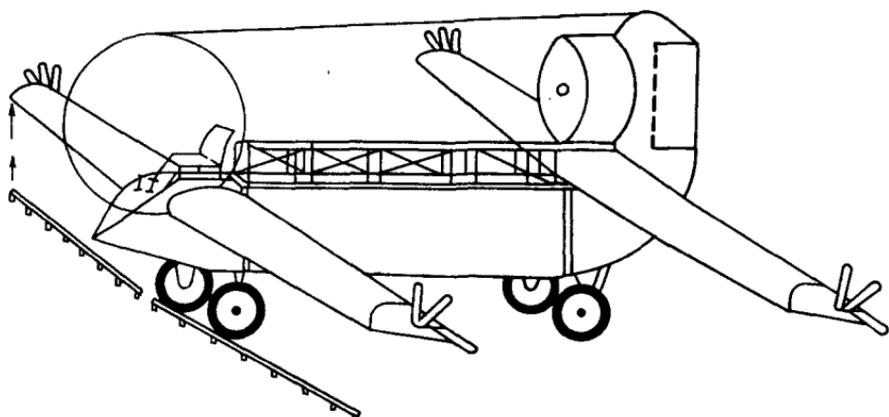


Рис. 9. Проект самолета для сельскохозяйственной авиации

шее, $\lambda = 16,3$, увеличено за счет "перьеобразных" выступов на торцах. Качество крыльев, по расчету, равняется 48 при крейсерской скорости самолета $v = 850$ км/ч ($M = 0,78$). На нижней поверхности крыла смонтированы распорки (примерно посредине размаха каждого крыла) и дополнительные баки для горючего, размещенные у торцов крыльев. Эти устройства одновременно помогают уменьшить изгибающий момент на крыльях. Самолет подобной конструкции может, как считают его авторы-проектировщики, обеспечить относительную полезную нагрузку, большую, чем для ныне существующих самолетов.

Для целей сельскохозяйственной авиации R. Amsden [1] предложил проект самолета, торцы крыльев которого имеют достаточно большую относительную толщину, а на них смонтированы три "пальца", установленные под разными углами к плоскости торца (рис. 9). Эти пластинки-"пальцы" служат для того, чтобы при разбрызгивании химикатов над полями препятствовать их движению вверх под действием торцевых вихрей, срывающихся с крыла, что крайне нежелательно для агротехников. Установка пластин на торцах крыльев направляет струи химикатов только вниз, что увеличивает эффективность работы сельскохозяйственной авиации.

За последние годы были проведены исследования явлений, происходящих при обтекании торцов крыльев. В.А. Киселев [1] опубликовал результаты опытов в аэродинамической трубе Московского авиационного института, а J.J. Spillman [1] — в аэродинамической трубе Крэнфилдского технологического института в США. Однако еще задолго до наших дней, в 1897 г. Lanchester запатентовал предложение использовать пластинки-законцовки для снижения вихревого сопротивления, как о том сообщает E.F. Blick [1]. В последующие годы различные исследователи за рубежом изучали эффективность подобных законцовок, имеющих разную форму и установленных в разных положениях. Так, было выявлено, что установка подобных "крылышек" на обычном транспортном самолете экономит расход горючего на 7%, а на самолетах вертикального взлета и посадки на 9%.

В Крэнфилдском институте изучалось влияние на качество крыла установленных на его торцах маленьких пластинок — "флюгеров", по 3—4 штуки на каждом, с корневой хордой, составляющей примерно 16% от корневой хорды крыла, а размах — примерно равный 1/4 торца крыла. Натурные испытания на тренировочно-учебном самолете показали около 25% увеличе-

ния максимального качества крыла. Происходит это за счет "выпрямления" потока, спирально закручивающегося вокруг плоского торца крыла без законцовок, поднимающегося с нижней к верхней поверхности, образуя над ней вихревую пелену, которая потом стекает с торца крыла. Для большей эффективности, как выяснилось при опытах в аэродинамической трубе, концевые сечения пластинок-"флюгеров" должны быть выпукло изогнутыми, так чтобы направление касательной к линии выпуклости, соединяющей носик и корневое сечение пластины, было близким направлению местного течения при положительных углах атаки крыла. Угол наклона этой касательной к горизонтали изменяется на 20% от хорды торца крыла, считая его от корня. Кроме того, пластинки должны быть расположены по спирали вокруг торца крыла, причем каждая выдвинута вперед на 15% и более от пластинки, расположенной перед ней. Увеличение числа пластинок может уменьшить изгиб и скручивание, необходимые для каждой из них. Во всех этих экспериментах использовалось прямоугольное крыло.

В аэродинамической трубе Московского авиационного института изучались модели прямоугольных и стреловидных крыльев, концевые части которых выполнены в виде отдельных жестких "перьев". Эти перья-законцовки имели в сечении форму аэродинамического профиля и с помощью вертикальных шарнирных устройств могли устанавливаться под различными углами атаки. Применение "перьевых" законцовок на стреловидных крыльях обусловлено стремлением улучшить их характеристики на малых скоростях, т.е. на режимах взлета и посадки современных скоростных самолетов. На рис. 10, а показан общий вид модели крыла с разрезными торцами - "перьевыми" законцовками, а на рис. 10, б - полученная в результате испытаний поляра крыла с развернутыми и убранными законцовками. Из ее рассмотрения видно, что при углах атаки $\alpha > 6^\circ$ раздвижные "перьевые" законцовки обеспечивают увеличение коэффициента подъемной силы C_y и одновременно падение коэффициента гидродинамического сопротивления C_x (за счет уменьшения индуктивного сопротивления, как было показано выше), что в целом повышает аэродинамическое качество крыла $k = C_y/C_x$. Для углов атаки $\alpha = 8 \div 12^\circ$ качество крыла возрастает на 20.7 - 23.7%, что весьма существенно. Установка "перьев" на торце стреловидного крыла, помимо самого положительного эффекта раздвижных законцовок, увеличивает размах и удлинение крыла, что также улучшает его аэродинамические характеристики. Поэтому для вы-

196

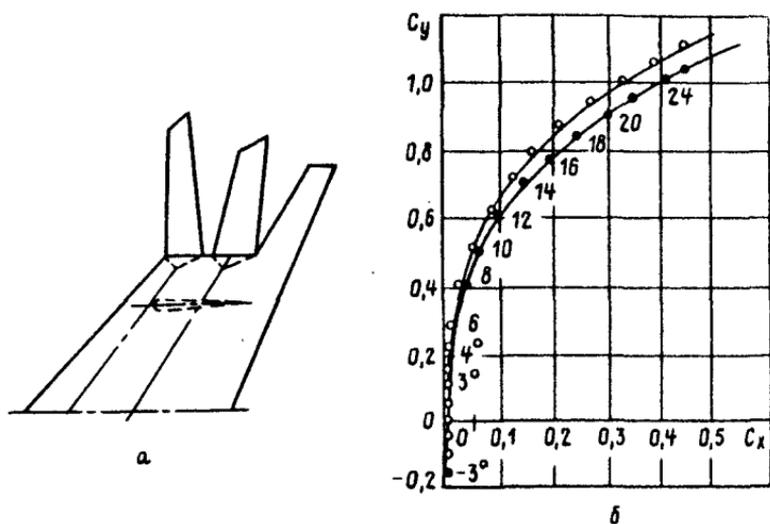


Рис. 10. Характеристики крыла с законцовками

явления непосредственного влияния разрезных торцов исследовались прямые крылья с разрезными и раздвижными "перьями" на концах, при которых размах, удлинение и площадь крыла оставались постоянными. Эта конструкция достаточно похожа на конструкцию крыльев с пластинками-"флюгерами", которую описал J. J. Spillman [1,2]. В результате экспериментов в аэродинамической трубе В.А. Киселев выявил следующие преимущества крыла с разрезными законцовками на торце: 1. Большая величина коэффициента подъемной силы C_y и $C_{y \max}$, особенно при $\alpha_p > 0$. (α_p - угол установки пера-законцовки по отношению к крылу). Для случая $\alpha = 0^\circ$ величина $C_{y \max}$ возросла на 7%. 2. Меньшее значение коэффициента гидродинамического сопротивления C_x при углах атаки крыла $\alpha > 4^\circ$. Для варианта $\alpha_p = -8^\circ$ величина C_x падала на 5-16%. 3. Большая величина аэродинамического качества при углах атаки крыла $\alpha > 5^\circ$ (для варианта $\alpha_p = -8^\circ$ прирост качества составляет 5-18%). Проведенные для сравнения испытания крыла со сплошными законцовками показали, что оно не обладает преимуществами, выявленными у разрезного крыла.

Снижение гидродинамического сопротивления за счет уменьшения его индуктивной составляющей, которое происходит одновременно с ростом подъемной силы крыла с разрезными законцовками, вызывается, как уже указывалось, тем, что пластинки-перья отклоняют поток вниз и вертикальная состав-

ляющая его скорости вычитается из индуктивной скорости. Вероятно, концевой вихревой жгут, индуцируемый передним пером, попадает на концевую часть пера, расположенного сзади, и гасит свою индуктивную скорость и концевой вихревой жгут последующего пера, тем самым уменьшаются индуктивная скорость и индуктивное сопротивление. В гидротрубе В.А. Киселевым были проведены эксперименты по визуализации обтекания такой конструкции — модели крыла с торцевыми перьями-законцовками. В результате опытов обнаружено, что максимальный эффект гашения индуктивной скорости, проявляющийся в смещении линии тока визуализирующей жидкости к хорде концевого профиля пера, существует, когда каждое последующее перо несколько сдвинуто к корню крыла по сравнению с предыдущим. Таким образом, располагая законцовки под определенным углом к направлению движения, можно добиться желаемого снижения индуктивного сопротивления.

Кроме проблемы повышения качества крыла, существует еще одна проблема, для решения которой с успехом привлекается изучение особенностей строения крыльев птиц. Это проблема малозумности или бесшумности обтекания. Орнитологам давно известно о бесшумном полете различных сов, сычей и других родственных им птиц. W. Neuhaus, H. Bretting и B. Schweizer [1] провели изучение морфологии крыльев совиных, которое выявило следующие особенности, обеспечивающие требования, предъявляемые им ночным образом жизни хищных птиц. Во-первых, крылья сов округлые, широкие, удобные для птиц, летающих среди лесных закоулков со скоростью 25–30 км/ч, в отличие, например, от уток — скоростных птиц (их скорость полета может достигать 75 км/ч), обладающих узкими крыльями, сходящими к узким, острым кончикам. Кроме того, крылья сов гораздо мягче и эластичнее, а их поверхности (и нижняя, и верхняя) более пушистые, покрытые густым слоем мелких перышек и пуха, чем у тех же уток или других видов птиц. В этой "пушистости", "пористости" пера ученые видят одну из причин уменьшения шума при полете. Этому же способствует "гребенка" с загнутыми кромками мелких перышек, расположенная на передней кромке крыла, и пушистая бахрома на его задней кромке. "Гребенка" действует как прекрасный турбулизатор, предотвращая отрыв потока с крыла и прижимая поток к поверхности.

Были проведены сравнительные исследования по измерению и анализу акустических характеристик полета сычей и уток. Записи шума полета уток велись с помощью микрофонов, уста-

новленных на лугу у пруда – на привычной трассе полета уток. Полученные данные затем анализировались с помощью звукочастотных спектрографов. Шумы полета ручных сычей записывались в большом спортивном зале, так как уровень внешних шумов – помехи на природе – настолько выше шума полета сов, что выделить последний просто не представлялось возможным. Анализ проведенных записей показал, что пики звуковых давлений при парящем полете у сов лежат в полосе $200\div 700$ Гц, у уток – 4000 Гц. Максимальные амплитуды звуковых давлений при парящем полете, лежащие у сов в полосе частот 200 Гц, а у уток – 4000 Гц, отличаются в 30 раз. В режиме машущего полета этот коэффициент возрастает до 200; эта же величина характеризует всю полосу частот, рассматриваемую целиком.

С целью выяснения особенностей обтекания крыльев сов по сравнению с крыльями других птиц, в частности уток, в аэродинамической трубе были испытаны крылья тех и других. В задачу экспериментов входило получение картины обтекания крыльев, выяснение роли зубчатой гребенки на передней кромке и бахромы на задней. Визуализация режимов обтекания производилась с помощью обдува дымом крыла, помещенного в поток аэродинамической трубы. Скорость потока в трубе при испытаниях крыльев сов составляла $6\div 10$ м/с, крыльев уток – $15\div 20$ м/с, что хорошо соответствует скоростям полета этих птиц в естественных условиях. Скорость обдува дымом равнялась 3 м/с. Авторы проведенного эксперимента отмечают, что при увеличении скорости обдува дымом до 10 м/с характер вихревых зон на крыльях оставался неизменным, отличие выражалось лишь в величине вихрей. К сожалению, в качестве результатов экспериментов авторами приводятся только графические схемы картин обтекания, а не фотоснимки.

При сравнении обтекания крыльев сов и уток ясно видно, что у первых поток достаточно плотно и гладко прилегает к поверхности крыла, а у вторых наблюдаются заметные вихревые области, причем расположены они вблизи передней кромки крыла; позади этих вихревых зон поток отрывается от поверхности крыла. Предотвращение отрыва у сов происходит за счет зубчатой гребенки перышек на передней кромке, о чем упоминалось выше. Ампутация этой гребенки – турбулизатора немедленно приводит режим обтекания крыла совы к режиму обтекания утиного крыла. Кроме того, следует отметить наличие значительной вихревой зоны на нижней поверхности крыльев уток. Отсутствие такой зоны завихренности у

сов, вероятно, следует связывать с большой мягкостью, пушистостью их крыльев. Эта "подушкообразность" препятствует возникновению одновременно и отрыва, и значительной турбулентности.

Помимо работ, посвященных проблеме крыльев с разрезными торцами и законцовками, определенный интерес представляют работы, посвященные различным режимам полета птиц, в первую очередь парению. Вопросы, связанные с аэродинамикой парящего полета, рассматриваются и теоретически (R. W. Blake [2]) и экспериментально (G. Chr. Parrott [1]). В первом случае предлагается математическая модель горизонтального парения крупных водяных птиц, таких как фламинго, пеликаны, альбатросы. Автор исследования считает, что таким способом можно оценить различные компоненты силы сопротивления (например, профильного, индуктивного), величины начальной и конечной скорости парения. Особое внимание уделяется влиянию близости поверхности раздела сред, которое выражается в уменьшении индуктивного сопротивления и возрастании аэродинамического качества крыла птицы. Эксперименты в аэродинамической трубе проводились с дрессированным черным грифом. Сделанные во время опытов фотоснимки позволили получить уточненные данные о геометрических характеристиках крыльев птицы. Кроме этого, вычислялась сила сопротивления и подъемная сила. Полученные результаты дают авторам основание утверждать, что мнение о необычно низком аэродинамическом сопротивлении этого вида птиц не подтверждается.

Упомянутые работы принадлежат к числу тех, которые с помощью методов аэродинамики решают проблемы биологического характера. К подобным относятся также работы, посвященные происхождению активного полета позвоночных животных (R. Lewin [1], G. Carle и др. [1]). Рассматриваются две теории: по одной животные, жившие на деревьях, перешли к полету через стадию скольжения, парения в воздухе. Другая теория видит процесс развития полета в переходе бегающих по земле животных к прыжкам и размахиванию передними конечностями (протокрыльями). Для решения вопроса о том, какая теория справедлива, исследователи изучали скелет археоптерикса и созданную ими модель протоптицы, однако к окончательным выводам прийти не смогли.

Анализ действия машущего крыла птицы (его режима работы, его эффективности) как движущейся в воздухе колебательной системы дан в работах А.А. Борина и Н.В. Кокшайского [1, 2]. К ним примыкает работа этих же авторов об оценке

энергетического совершенства крылового аппарата птиц (А.А. Борин и Н.В. Кокшайский [3]). Указанные работы выделяются сочетанием серьезного тщательного подхода к разбираемому вопросу с точки зрения аэродинамики и глубоким проникновением в сущность биологических явлений, происходящих в организме живого летающего объекта. Именно это позволило авторам показать, что в случае рассмотрения режима движения крыльев птиц, особенность которого заключается в том, что частоты взмахов остаются практически постоянными при широком диапазоне скоростей полета, объяснение этому явлению нужно искать не в резонансном режиме работы крыльев птиц (как полагает С.В. Першин [7]), а во взаимодействии аэродинамических, механических и физиологических факторов.

Изучая зависимость эффективности работы машущего крыла от частоты взмахов, авторы пришли к выводу, что у птиц, в отличие от классической колебательной системы, отсутствует накопитель энергии в форме упругого элемента, однако диссипация значительной части энергии взмахов крыла предотвращается наличием своеобразного компенсирующего механизма. Его основу составляют периодические движения центра масс птицы по вертикали и сопряженные с ними изменения его горизонтальной скорости.

Крайне важной нам представляется проблема (и ее решение) энергетики полета птиц в сравнении с энергетикой самолетов, поскольку тем самым показана ложность и в известной мере спекулятивность утверждения о необычайном энергетическом совершенстве живых существ вообще и птиц в частности. Вводя критерий, характеризующий меру превращения энергии двигателя (для птиц - энергии двигательных, летательных мышц) в транспортную работу, авторы определяют затем зависимость между этим критерием и весовой нагрузкой, отнесенной к мощности G/N , которая зависит от скорости полета и эквивалентного качества $k_{\text{ЭКВ}} = k\eta$ (k - аэродинамическое качество, η - к.д.д. двигателя). Рассматривая эти характеристики для различных самолетов, птиц и насекомых, иллюстрированные таблицей 3 и рис. 1.1, авторы приходят к выводу, что по величине $k_{\text{ЭКВ}}$, т.е. по безразмерной характеристике энергетического совершенства летающих объектов, птицы сравнимы с самолетами, а основной причиной более высоких относительных нагрузок (G/N) у птиц и насекомых является меньшая скорость их полета. Заключение А.А.Борина и Н.В. Кокшайского о том, что "летающие

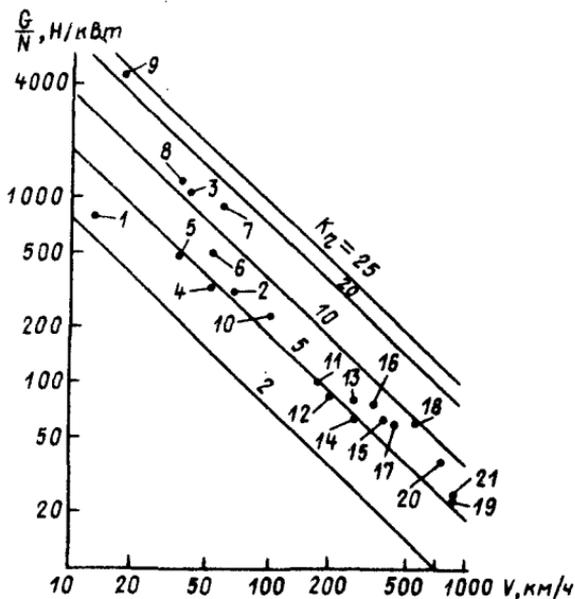


Рис. 11. Зависимость отношения весовой нагрузки к мощности от скорости полета у летающих животных и самолетов (цифры около экспериментальных точек соответствуют номерам объектов в таблице 3)

животные не обладают какими-либо необычными преимуществами перед самолетами по уровню энергетического совершенства" [3], принципиально важно.

Большое значение для понимания аэродинамики полета птиц имеют экспериментальные исследования, проведенные Н.В. Кокшайским ([3, 4]), и им же совместно с В.И. Петровским [1, 2], посвященные визуализации следа за летящей птицей. Сущность метода заключалась в фотографировании движения древесной, бумажной пыли или таких средств визуализации, как пылинки тимофеевки, летучки одуванчика, через облако которых пролетала птица. Снятые с достаточно большой экспозицией "размазанные" изображения пылинок можно рассматривать как отрезки траекторий частиц в среде. Авторы пришли к заключению, что аэродинамический след летящей птицы можно представить как последовательность толстых вихревых колец с проходящей вдоль их осей интенсивной изгибающейся струей. Знание конфигурации следа за летящей птицей может в дальнейшем послужить и для расчетов тяги, развиваемой птицей в полете, т.е. для решения вопроса об эффективности ее

Таблица 3

№ п/п	Объект	Взлетная масса, кг	Нагрузка на мощность, Н/кВт	Скорость полета, км/ч	К _т
1	2	3	4	5	6
Животные					
1	Пустынная саранча	$2,08 \cdot 10^{-3}$	795.9	12.6	2.8
2	Одна из американских слявок	$11.23 \cdot 10^{-3}$	305.8	64.4	5.5
3	То же	$20.72 \cdot 10^{-3}$	1050.9	38.9	11.3
4	Зяблик	$22.5 \cdot 10^{-3}$	335.4	50.0	4.7
5	Волнистый попугайчик	$35.0 \cdot 10^{-3}$	492.0	35.0	4.8
6	Скворец	$72.8 \cdot 10^{-3}$	492.1	50.4	6.9
7	Почтовый голубь	0.384	902.9	57.9	14.5
8	Белошейный ворон	0.480	1208.1	36.0	12.1
Мускулолет					
9	"Gessamer Condor"	110	4399.9	17.7	21.6
Мотопланер					
10	Scheibe SF-25 "Motorfalke"	465	230.7	110	6.4
Поршневые самолеты					
11	Z-126 "Trenner"	750	97.3	180	4.9
12	SIAI-Marchetti "Riviera FN-333"	1485	79.2	220	4.8
13	Hawker Siddeley "Dove 8"	4060	77.6	270	5.8
14	Douglas DC-3 "Dakota"	11436	62.7	285	5.0
15	Airspeed A.S. 57 "Ambassador"	24959	62.5	387	6.7
26-2					203

1	2	3	4	5	6
16	Aviation Traders ATL-98 "Carvair"	33475	76.0	350	7.4
Самолеты с ТВД					
17	Handley Page "Dart Herald"	19504	60.8	426	7.2
18.	Short "SC. 5/10 Belfast"	102058	58.5	540	8.8
Самолеты с ТРД					
19	Boeing 727-100	68950	32.1	890	7.9
20	Hawker Siddeley "Comet 4C"	73482	40.7	750	8.6
21	BAC "Super VC-10"	152000	33.0	892	8.1

полета, с к.п.д. ее летательного аппарата, а отсюда — и для сравнения эффективности машущего крыла с эффективностью двигателей, применяемых в технике. Среди работ, посвященных изучению проблем машущего крыла, весьма многообещающей представляется статья В.В. Гуляева и М.И. Ништа [1], в которой исследования характеристик полета птиц и насекомых проводится с помощью выполненных на ЭЦВМ многочисленных расчетов, в результате которых дается оценка увеличения несущих свойств машущих крыльев за счет различных факторов.

Глава 6

АЭРОДИНАМИКА ПОЛЕТА НАСЕКОМЫХ

Аэродинамика полета насекомых представляет для исследователей не менее интересный предмет, чем изучение полета птиц. За последние полтора десятилетия можно отметить появление значительного числа работ, посвященных этой проблеме,

что говорит об усилившемся внимании ученых к ней. Изучение особенностей полета насекомых, как и других живых объектов биологической аэромеханики, можно рассматривать с двух позиций. Прежде всего, понимание и правильная трактовка явлений, происходящих при движении насекомых в воздухе, может дать ценный и полезный материал для решения чисто биологических задач, как, например, морфологии насекомых, функциональных особенностей всего их организма целиком и его отдельных частей, их взаимодействия. Особое значение биоаэромеханика, в частности определение функциональной роли отдельных органов тел насекомых, осуществляющих полет, и сил, возникающих при этом, имеет для решения вопросов эволюции насекомых (А.К.Бродский [2]).

С другой стороны, изучая биоаэродинамику полета насекомых, можно надеяться постичь принципиальные особенности, физические закономерности машущего полета в определенном, ограниченном диапазоне режимов движения. Однако учитывая, что полет насекомых из-за малости размеров тел и скоростей движения протекает при малых числах Рейнольдса, а следовательно, существует слишком большое несоответствие масштабов между насекомыми и летающими техническими объектами, то трудно ожидать здесь явлений и закономерностей, которые целесообразно было бы применить в той или иной области техники. Все же с точки зрения инженерно-технического подхода заслуживает внимания изучение формы тел различных насекомых, взаимное расположение отдельных органов, их "конструктивные" особенности. Наконец, следует указать, что совершенно справедливо основное внимание ученых, занимающихся биоаэромеханикой насекомых, привлекают явления нестационарности, поскольку решение проблем взаимодействия машущего крыла и обтекающей его воздушной среды может быть найдено только таким образом. Подход к задачам биоаэромеханики машущего полета с точки зрения стационарной аэродинамики может привести к неправильному пониманию структуры и работы крылового аппарата летающих живых объектов, в частности насекомых.

В настоящее время существует значительное число работ, рассматривающих влияние нестационарности на аэродинамику полета насекомых. Т. Weis-Fogh [1] во время своих исследований обнаружил механизм создания насекомыми дополнительной подъемной силы (впоследствии J. Hunt [1] назвал это наблюдение "открытием"): во время движения крыльев вверх, то есть взмаха, насекомое в самой крайней точке схлопывает крылья,

я затем быстро разводит их, при этом меняется угол атаки крыла, так что вокруг каждого крыла создается дополнительная циркуляция в результате попадания воздуха в промежуток между крыльями. Второе явление, особо привлекающее внимание исследователей, — вихреобразование вокруг летящего насекомого и вихревой след за ним.

Работы двух групп ученых — сотрудников кафедры энтомологии Ленинградского Государственного университета во главе с А.К. Бродским (А.К. Бродский и В.Д. Иванов [1]), S.B. Savage'a, В. G. Newmal'a и D.Wong'a [1] наиболее интересно отражают достижения в решении проблемы обтекания тел и крыльев насекомых при различных режимах полета, поступательном движении и во время зависания, так называемого ховеринга. В том и другом случае основную роль в создании аэродинамических сил играет вихреобразование. Успешному его изучению и появлению достаточно достоверных представлений о процессах, протекающих при взаимодействии воздушной среды и нестационарно движущихся крыльев, способствовали новые методы исследования, прежде всего, визуализация обтекания насекомого непосредственно во время аэродинамического эксперимента, поскольку провести опыт с насекомым в природных условиях не представляется возможным. В указанных выше работах можно почерпнуть достаточно полное представление об уровне, возможностях и методах визуализации обтекания крыльев насекомых. Кроме того, А.К.Бродский дает подробный обзор литературы, отражающей имевшие место в аэродинамике насекомых попытки визуализировать обтекание их воздухом во время полета и "модели" структуры потока, построенные на основе полученных данных (М.А.С.Chance [1], С.Р. Ellington [1, 2, 3]). При этом отмечается, что несовершенство аппаратуры и методики проведения эксперимента (употребление закрепленных в рабочей части аэродинамической трубы схематизированных моделей насекомых или их мертвых тел) давало фото- и киноматериал, практически не поддающийся расшифровке, либо искажающий явления, происходящие в живой природе.

Наиболее современной, позволившей авторам получить достоверные ценные данные о вихреобразовании во время полета насекомых, нам представляется методика, разработанная А.К.Бродским и его соавторами. Однако и ими было допущено одно серьезное нарушение натуральных условий: в аэродинамической трубе испытывалось прикрепленное к державке насекомое. Возможно, что эксперименты с насекомым в свободном полете заставят уточнить картину вихреобразования, к представлению о которой пришли авторы опытов.

Для получения фотографий спутного следа за летящим насекомым они использовали метод введения в набегающий на закрепленное насекомое поток визуализирующего порошка — мелко-дисперсного гидрокарбоната натрия. Во время опыта велось фотографирование "срезов" потока, освещенных узкой (менее 1 мм) световой полосой от луча лазера. Таким образом были получены плоские картины спектров обтекания тел трех видов насекомых и спутного следа за ними в горизонтальной и вертикальной плоскостях. Анализ этих проекций позволяет составить представление о трехмерной картине вихревой структуры потока, обтекающего летящее насекомое. Авторы проведенных работ предлагают следующее объяснение зарегистрированным картинам: на фотографиях следа за насекомым (вид сбоку) просматриваются расположенные в шахматном порядке вихри, между которыми проходит зигзагообразная струя. На фотографиях (вид сверху) след представлен попарно расположенными относительно центральной струи вращающимися во встречных направлениях вихрями. Предлагается следующее объяснение зарегистрированным картинам: при движении крыльев вверх и вниз возле тела насекомого образуется вихрь (при махе вниз — на спинной стороне тела, при махе вверх — на брюшной). Наиболее быстрый поток воздуха отмечен между "спинным" вихрем и телом насекомого и направлен назад. Скорость вращения "спинного" вихря выше, чем брюшного. Кроме того, вокруг передней кромки крыла насекомого отмечен вихрь, противоположный по направлению вращения "спинному" или "брюшному". Возле торца крыла также вращается концевой вихрь, отбрасывающий воздух от тела насекомого. А.К. Бродский считает, что во всех случаях наблюдались поперечные срезы вихревых колец.

При махе крыльев вниз "спинной" вихрь вместе с циркуляционным потоком вокруг крыльев образует кольцо над телом насекомого. При развороте крыльев в нижней точке траектории это кольцо смещается назад. При этом циркуляция вокруг крыльев образует новый, "брюшной" вихрь и одновременно возникает новая циркуляция, соответствующая движению крыльев вверх. В верхней точке траектории совместно с концевым вихрем она образует новое кольцо и т.д. Таким образом, след за летящим насекомым можно представить как цепочку сцепленных вихревых колец (рис. 12). Соединены они друг с другом в нижней и верхней точках траектории, когда периодически наступает смена направления циркуляции вокруг крыльев.

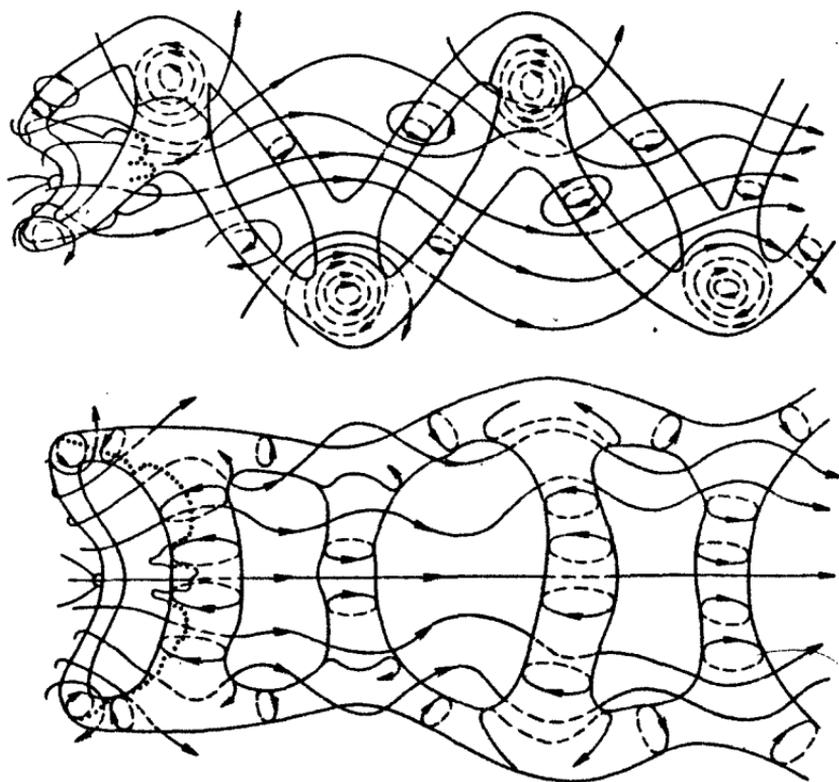


Рис. 12. Схема вихревого следа за летящей бабочкой

Подобная трактовка результатов визуализации летящего насекомого предлагается на основе изучения одного представителя отряда чешуйчатокрылых – бабочки-толстоголовки. Однако, как считают авторы проведенной работы, есть основание распространить эту картину вихреобразования в следе как цепочку сцепленных между собой колец и на другие виды насекомых, частота биения крыльев которых не превышает 50 Гц и которые не принадлежат к самым мелким.

Как уже было указано, трудно рассчитывать на широкие возможности использовать обнаруженные особенности аэродинамики полета насекомых технических летательных аппаратов, однако есть аспекты проблемы, где такая задача не представляется совсем безнадежной. Прежде всего, вероятно, может быть полезно изучение формы и конструктивных особенностей крыльев насекомых. Их гофрировка и наличие желобков служат направленному радиальному стеканию струи воздушного потока по крылу. Быть может, это связано и с устранением срыва

потока с торцов (вершин) крыльев, что представляется аналогичной, пусть далекой, крыльям с разрезными торцами (у птиц — концевые перья на крыльях).

Дальнейшие исследования могут определить целесообразность переноса подобных особенностей конструкции крыльев насекомых в технику. Первые успешные шаги в этом направлении сделаны. В аэродинамической трубе Колорадского университета (США) M. Latgess испытывал модели крыльев с вибрирующими металлическими полосами, прообразом которых послужили крылья стрекозы. Автор работы отмечает незначительную завихренность за испытывавшимися крыльями и крыльями стрекозы, что позволяет резко увеличить скорость набора высоты и эффективность полета. Подобная конструкция с успехом может применяться при проектировании самолетов вертикального взлета и посадки, самолетов с крыльями изменяемой геометрии и даже, как считает M. Latgess, при постройке космических кораблей будущего, которые смогут приземляться на небольших площадках — пассажирских аэродромах.

Исследование аэродинамики полета стрекозы провел также С. Е. Лап [1]. С помощью разработанного им метода на основе нестационарной теории несущей поверхности с квазинепрерывной нагрузкой он показал, что крыло-тандем стрекозы может создавать значительную тягу при высоком к.п.д. и при этом соответствующий механизм позволяет заднему крылу использовать энергию следа за передним крылом. Наконец, следует указать на работу Г. И. Петрова, М. Н. Захаренкова и А. И. Швеца [1], в которой рассматривается полет насекомых, имеющих строение крыльев трех типов: крыло с жесткой несущей поверхностью, крыло с жесткой передней кромкой и эластичной поверхностью всего крыла, модель деформируемой поверхности. Авторы отмечают, что при теоретическом исследовании следует вести расчет несущей вихревой поверхности и вязкого обтекания машущего крыла. В результате проведенных в аэродинамической трубе опытов по визуализации спектров обтекания модели дымом и киносъемке полета насекомых определены кинематические параметры при различных режимах полета насекомых. Полученные данные позволяют авторам сделать вывод, что некоторые аспекты изучения машущего полета живых объектов могут сказаться полезными в технике.

* Ссылку на эту работу можно найти в журнале "Изобретатель и рационализатор", 1984, №11, с. 34.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Материалы, представленные в приведенном выше обзоре, свидетельствуют о значительном интересе к проблемам биологической гидро- и аэродинамики среди широкого круга исследователей. Однако только незначительная часть упомянутых работ в будущем может получить практическое применение в технике. Среди них следует упомянуть плавниковые движители, разрезные законцовки торцов крыльев, некоторые геометрические формы тел морских животных и рыб. Представляются интересными различные особенности нестационарного движения крыльев насекомых. При этом, конечно, не следует забывать о сравнительно малых числах Рейнольдса, характеризующих их полет, т.е. о несоответствии масштабов, что может иметь значение в случае попыток найти обнаруженным явлениям какие-либо технические приложения.

ЛИТЕРАТУРА

- Агарков Г.Б., Хоменко Б.Г., Хаджинский В.Г. [1] Морфология дельфинов. - Киев: Наук. думка, 1974, 167 с.
- Алеев Ю.Г. [1] Функциональные основы внешнего строения рыб. - М.: Изд-во АН СССР, 1963, 391 с.
- Алеев Ю.Г. [2] Нектон. - Киев: Наук. думка, 1976, 392 с.
- Алеев Ю.Г., Овчаров О.П. [1] Трехмерная картина обтекания движущейся рыбы. - Вопр. ихтиологии, 1973, 13, № 6, 1112-1115.
- Басин А.М., Короткин А.И., Козлов Л.Ф. [1] Управление пограничным слоем судна. - Л.: Судостроение, 1968, 492 с.
- Басин М.А., Косов Б.В., Ксенжонок Н.Н., Шадрин В.П. [1] Результаты гидродинамических и кавитационных исследований твердой модели меч-рыбы. - Тр. Ленингр. о-ва естествоиспыт., 1976, 73, № 5, 70-78.
- Бегак М.В., Грушанская Ж.Я., Шадрин В.П. [1] Геометрические характеристики ската *Dasyatis pastinaca* и оптимальные аэродинамические формы. - Тр. Ленингр. о-ва естествоиспыт., 1976, 73, № 5, 52-60.
- Белоцерковский С.М., Скрипач Б.К., Табачников В.Г. [1] Крыло в нестационарном потоке газа. - М.: Наука, 1971, 767 с.

Борин А.А., Кокшайский Н.В. [1] К вопросу о режиме работы крыльев птиц. - Докл. АН СССР, 1982, 266, № 3, 726-729.

Борин А.А., Кокшайский Н.В. [2] Эффективность работы крыла птицы как колебательной системы. - Докл. АН СССР, 1983, 269, № 4, 971-976 - РЖМех, 1983, 7Г815.

Борин А.А., Кокшайский Н.В. [3] К оценке энергетического совершенства летательного аппарата птиц. - Докл. АН СССР, 1984, 277, № 2, 489-493.

Бродский А.К. [1] Новый подход к изучению машущего полета насекомых. - Тезисы докл. IX съезд Всес. этномологического о-ва. Киев, 1984. Ч. I. Киев, 1984, 68.

Бродский А.К. [2] Аэродинамические особенности полета насекомых. V. Вихреобразование в машущем полете. - Вестн. ЛГУ, 1984, № 21, 23-29.

Бродский А.К., Иванов В.Д. [1] Роль вихрей в полете насекомых. - Зоол. ж., 1984, 63, № 2, 197-208.

Бродский А.К., Иванов В.П. [1] Аэродинамические особенности полета насекомых. I. Зависимость коэффициента лобового сопротивления от числа Рейнольдса. - Вестн. ЛГУ, 1973, № 15, 17-20.

Бродский А.К., Иванов В.П. [2] Аэродинамические особенности полета насекомых. II. Спектры обтекания. - Вестн. ЛГУ, 1974, № 3, 16-21.

Бродский А.К., Иванов В.П. [3] Аэродинамические особенности полета насекомых. III. Обтекание крыльев поденки. - Вестн. ЛГУ, 1975, № 3, 7-10.

Бродский А.К., Иванов В.П. [4] Аэродинамические особенности полета насекомых. IV. Материалы по полету поденки. - Вестн. ЛГУ, 1981, № 15, 12-18.

Бурдак В.Д. [1] Типы чешуи как этапы исторического развития гидродинамической функции кожного покрова рыб. - Зоол. ж., 1973, 52, № 8, 1208-1213.

Бурлаков В.Д., Грушанская Ж.Я., Соколов В.Е. [1] Геометрические особенности тел и теоретические чертежи двух видов черноморских дельфинов в связи с их гидродинамическими характеристиками. - Бюл. Моск. о-ва испыт. природы. Отд. биол., 1977, 82, № 2, 62-66.

Васильев А.С., Ильичев А.Ф., Казберук Е.Д., Цинобер А.Б. [1] - Изв. АН СССР. Мех. жидкости и газа, 1975, № 1, 157-159.

Гиневский А.С., Иселевич В.А., Колесников А.В., Лапин Ю.В., Пилюшенко В.Н., Секундов А.Н. [1] Методы рас-

чета турбулентного пограничного слоя. - Итоги науки и техн. ВИНТИ. Механика жидкости и газа, 1978, 11, 155-304.

Голубев В.В. [1] Труды по аэродинамике. - М.-Л.: Гос-техиздат, 1957, 980 с.

Горелов Д.Н. [1] Об эффективности машущего крыла как движителя. - В сб.: Бионика (Киев), 1976, № 10, 49-53.

Горелов Д.Н. [2] Экспериментальное исследование тяги машущего крыла. - В сб. Бионика (Киев), 1980, № 14, 52-55.

Гребешов Э.П., Сагоян О.А. [1] Гидродинамические характеристики колеблющегося крыла, выполняющего функции несущего элемента и движителя. - Тр. ЦАГИ, 1976, № 1725, 3-30.

Григорьев В.А., Ивченко В.М., Кулак А.П. [1] Гидрореактивное движение водных животных - В сб.: Бионика (Киев), 1969, № 3, 66-71.

Грунтфест Р.А., Дерезина Н.П. [1] Колебание упругой ласты в потоке жидкости. - В сб.: Бионика (Киев), 1981, № 15, 29-39.

Грушанская Ж.Я. [1] Методы определения скорости, гидродинамического сопротивления и мощности дельфинов. - Тр. Ленингр. о-ва естествоиспыт., 1975, 72, № 5, 54-61.

Грушанская Ж.Я. [2] Определение скоростей плавания дельфина в естественных условиях и расчет коэффициента его гидродинамического сопротивления. - Тр. Ленингр. о-ва естествоиспыт., 1976, 73, № 5, 67-70.

Грушанская Ж.Я., Короткин А.И. [1] Гидродинамические характеристики твердых моделей черноморского ската и летучей рыбы. - Тр. Ленингр. о-ва естествоиспыт., 1976, 73, № 5, 60-66.

Грушанская Ж.Я., Короткин А.И., Тюшкевич В.А. [1] Исследование обтекания и гидродинамических характеристик твердых моделей плавников дельфина. - Тр. Ленингр. о-ва естествоиспыт., 1976, 73, № 5, 42-52.

Гуляев В.В., Ништ М.И. [1] Некоторые вопросы нестационарного обтекания машущего крыла. - В сб.: Идеи К.Э. Циолковского и соврем. науч. пробл. М., 1984, 152-156.

Довгий С.А., Каян В.П. [1] К методике определения тяги, создаваемой колеблющимся крылом. - В сб.: Бионика (Киев), 1981, № 15, 55-59.

Золотов С.С., Ходорковский Я.С. [1] Особенности сопротивления трения тел формы меч-рыбы. - В сб.: Бионика (Киев), 1974, № 7, 14-18.

Ильгамов М.А., Сулейманова М.М., Талдыкин В.М., Федяев В.Л. [1] Об одной модели волнового движителя. - Докл. АН СССР, 1978, 241, № 2, 309-311.

Калугин В.Н., Панчук В.И. [1] Течение вязкой несжимаемой жидкости вдоль бегущей волны (численные эксперименты). - В сб.: Бионика (Киев), 1970, № 4, 104-110.

Каян В.П. [1] О гидродинамических характеристиках плавникового движителя дельфина. - В сб.: Бионика (Киев), 1979, № 13, 9-15.

Каян В.П. [2] Экспериментальное исследование гидродинамического упора, создаваемого колеблющимся крылом. - В сб.: Бионика (Киев), 1983, № 17, 45-49.

Каян В.П., Козлов Л.Ф., Пятецкий В.Е. [1] Кинематические характеристики плавания некоторых водных животных. - Изв. АН СССР. Мех. жидкости и газа, 1978, № 5, 3-9.

Каян В.П., Пятецкий В.Е. [1] Биогидродинамическая установка замкнутого типа для исследования гидродинамики плавания морских животных. - В сб.: Бионика (Киев), 1971, № 5, 121-124.

Каян В.П., Пятецкий В.Е. [2] Кинематика плавания дельфина афалины в зависимости от режима ускорения. - В сб.: Бионика (Киев), 1977, № 11, 36-41.

Каян В.П., Пятецкий В.Е. [3] Гидродинамические характеристики дельфина афалины при различных режимах ускорения. - В сб.: Бионика (Киев), 1978, № 12, 48-55.

Киселев В.А. [1] Исследование эффективности крыла с перьевыми законцовками. - В сб.: Вопросы проектирования и конструкции самолетов (Москва), 1976, № 356, 21-29.

Коваль А.П. [1] Гистоструктура кожного покрова парусника и меч-рыбы. - В сб.: Бионика (Киев), 1982, № 16, 21-27.

Козлов Л.Ф. [1] Способы расчета гидродинамического сопротивления быстроплавающих рыб. - В сб.: Бионика (Киев), 1980, № 14, 3-12.

Козлов Л.Ф. [2] Биоэнергетический метод оценки гидродинамического сопротивления китообразных. - В сб.: Бионика (Киев), 1981, № 15, 3-16.

Козлов Л.Ф. [3] Теоретическая био-гидродинамика. - Киев: Вища школа, 1983, 237 с.

Козлов Л.Ф. [4] Оценка энергетических затрат скоростных рыб. - В сб. Гидродинамические вопросы бионики. Киев, 1983, 3-8 - РЖМех, 1984, 2Г870.

Козлов Л.Ф., Довгий С.А. [1] Скольжение китообразных на волнах зыби. - В сб.: Бионика (Киев), 1981, № 15, 49-54.

Козлов Л.Ф., Леоненко И.В. [1] Исследование влияния мезочевидного наконечника на сопротивление удлиненного тела вращения. - В сб.: Бионика (Киев), 1973, № 7, 8-14.

Козлов Л.Ф., Никишова О.Д. [1] К вопросу о гидродинамике плавания дельфинов. - В сб.: Бионика (Киев), 1974, № 8, 3-9.

Козлов Л.Ф., Олейник Р.А. [1] Теоретическое исследование гидродинамики водных животных, плавающих scombroидным способом. - В сб.: Бионика (Киев), 1978, № 12, 3-12.

Козлов Л.Ф., Першин С.В. [1] Комплексные исследования активного регулирования кожей дельфинов снижения гидродинамического сопротивления. - В сб.: Бионика (Киев), 1983, № 17, 3-12.

Кокшайский Н.В. [1] Биологическая гидродинамика. - Итоги науки и техн. ВИНТИ. Бионика, 1973, 1, 9-85.

Кокшайский Н.В. [2] Очерк биологической аэро- и гидродинамики (полет и плавание животных). - М.: Наука, 1974, 254 с.

Кокшайский Н.В. [3] Kokshaysky N.V. Tracing the wake of flying bird. - Nature, 1979, 279, № 5709, 146-148.

Кокшайский Н.В. [4] Вклад отечественной науки в изучение полета птиц. - Зоол. ж., 1982, 61, № 7, 971-987.

Кокшайский Н.В., Грушанская Ж.Я., Чекалова Л.А. [1] Влияние мехового покрытия на турбулентное течение в трубе. - Докл. АН СССР, 1983, 268, № 3, 727-731 - РЖМех, 1983, 7Г816.

Кокшайский Н.В., Петровский В.И. [1] Предварительные данные о характере следа за летящей птицей. - Докл. АН СССР, 1979, 244, № 5, 1248-1251.

Кокшайский Н.В., Петровский В.И. [2] След летящей птицы. - Природа, 1979, № 5, 100-102.

Колчинская А.З., Маньковская И.Н., Мисюра А.Г. [1] Дыхание и кислородные режимы организма дельфинов. - Киев: Наук. думка, 1980, 332 с.

Коренная Л.И. [1] Установка для исследований гидромеханики гибкой пластинки. - В сб. Бионика (Киев), 1976, № 10, 85-88.

Коренная Л.И. [2] Метод расчета волнового движителя. - В сб.: Бионика (Киев), 1981, № 15, 59-64.

Коробов В.И. [1] Экспериментальное исследование интегральных характеристик пограничного слоя на податливых пластинках. - В сб.: Бионика (Киев), 1980, № 14, 53-57.

Короткин А.И. [1] О механизме движения дельфинов на корабельных и ветровых волнах. - В сб.: Бионика (Киев), 1973, № 7, 27-31.

Кочин Н.Е., Кибель И.А., Розе Н.В. [1] Теоретическая гидромеханика. Ч. 1. - М.: Физматгиз, 1963, 584 с.

Кузьменко Г.М. [1] Гидробионика в судостроении и применение волномеханических аналогий в гидромеханике. - В сб.: Судостроение и судоремонт (Одесса), 1976, № 7, 146-148.

Куликов С.В., Храбкин М.Ф. [1] Водометные движители (теория и расчет). - Л.: Судостроение, 1980, 312 с.

Курбатов Б.В., Овчаров О.П. [1] Особенности гидродинамики севрюги. - Вопр. ихтиологии, 1976, 16, № 6, 1136-1139.

Логвинович Г.В. [1] Гидродинамика течений со свободными границами. - Киев: Наук.думка, 1969, 208 с.

Логвинович Г.В. [2] Гидродинамика гибкого тонкого тела. - Уч. зап. ЦАГИ, 1970, 1, № 2, 11-18.

Логвинович Г.В. [3] Гидродинамика плавания рыб. - В сб.: Бионика (Киев), 1973, № 7, 3-8.

Макаров А.П., Черный И.М. [1] Гидродинамический анализ пульсирующего движителя при нестационарной скорости перемещения. - В сб.: Бионика (Киев), 1974, № 8, 52-60.

Матюхин В.А. [1] Биоэнергетика и физиология плавания рыб. - М.: Наука, 1973, 156 с.

Меркулов В.И. [1] Бегущая волна на упругом теле, движущемся в идеальной жидкости. - В сб.: Бионика (Киев), 1970, № 4, 95-104.

Меркулов В.И., Савченко Ю.Н. [1] Экспериментальное исследование течения жидкости вдоль бегущей волны. - В сб.: Бионика (Киев), 1970, № 4, 104-110.

Мордвинов Ю.Б., Хромовских Б.В. О гидродинамических качествах калана. - В сб.: Гидродинамические вопросы бионики, Киев, 1983, 84-90 - РЖМех, 1984, 2Г875.

Некрасов А.И. [1] Теория крыла в нестационарном потоке. - М.: Изд-во АН СССР, 1947, 260 с.

Николаев Н.А. [1] Визуализация воздушного потока при изучении полета насекомых. - Науч. докл. высш. школы. Биол. н., 1977, № 6, 48-52.

Овчинников В.В. [1] Меч-рыба и парусниковые. - Калининград: Атлант НИРО, 1970, 269 с.

Осипенко С.Б., Савченко Ю.Н., Черный И.М. [1] Об эффективности гидроактивной пропульсивной системы с из-

меняемой формой. - В сб.: Бионика (Киев), 1981, № 15, 72-78.

Остроумов Г.А., Серавин Л.Н. [1] К вопросу о гидромеханике плавания водных животных. II. Движение в водной среде мелких и крупных животных благодаря изгибаниям тела и крупных животных на основе гребных ударов. - Вестн. ЛГУ, 1974, № 21, 28-36.

Першин С.В. [1] Прыжки дельфинов как средство получения информации об импульсной биоэнергетике скоростных водных животных. - В сб.: Вопросы бионики, М., 1967, 549-555.

Першин С.В. [2] Оптимизация кормового плавникового движителя в природе на примере китообразных. - В сб.: Бионика (Киев), 1969, № 3, 26-34.

Першин С.В. [3] Гидродинамическая характеристика китообразных и нормированная скорость плавания дельфинов в естественных условиях и в неволе. - В сб.: Бионика (Киев), 1969, № 3, 5-12.

Першин С.В. [4] О резонансном режиме плавания дельфинов. - В сб.: Бионика (Киев), 1970, № 4, 31-36.

Першин С.В. [5] Гидродинамический анализ профилей плавников дельфинов и китов. - В сб.: Бионика (Киев), 1975, № 9, 26-32.

Першин С.В. [6] Биогидродинамический феномен меч-рыбы как предельный случай скоростных гидробионтов. - В сб.: Бионика (Киев), 1978, № 12, 40-48.

Першин С.В. [7] К характеристике плавания микроорганизмов (весьма малые числа Рейнольдса). - В сб.: Гидродинамические вопросы бионики. Киев, 1983, 28-37 - РЖМех, 1984, 2Г869.

Першин С.В., Соколов А.С., Томилин А.Г. [1] Биомеханические основы регулируемого гидроупругого эффекта в плавниках - крыловых несущих поверхностях китообразных (дельфинов и китов). - Тр. Зоол. ин-та, АН СССР, 1974, 54, 266-305.

Петров Г.И., Захаренков М.Н., Швец А.И. [1] Аэродинамика полета насекомых. - Тез. 2-й Всес. конф. по пробл. биомех. Рига, 1979, Т. 3. Рига, 1979, 186-188.

Петрова И.М. [1] Гидробионика в судостроении. Обзор. - Л.: Изд-во ЦНИИТЭИИС, 1970, 270 с.

Поляхов Н.Н. [1] Теория нестационарных движений несущей поверхности. - Л.: Изд-во ЛГУ, 1960, 227 с.

Пятецкий В.Е., Каян В.П. [1] Некоторые кинематические характеристики плавания дельфина азовки. - В сб.: Бионика (Киев), 1972, № 6, 18-22.

Пятецкий В.Е., Каян В.П. [2] О кинематике плавания дельфина афалины. - В сб.: Бионика (Киев), 1975, № 9, 41-46.

Пятецкий В.Е., Каян В.П., Козлов Л.Ф., Семенов Н.П. [1] Устройство для исследования кинематики плавания дельфинов. - В сб.: Бионика (Киев), 1978, № 12, 55-58.

Пятецкий В.Е., Каян В.П., Кравченко А.М. [1] Экспериментальные установки, аппаратура и методика изучения гидродинамики плавания водных животных. - В сб.: Бионика (Киев), 1973, № 7, 91-102.

Романенко Е.В. [1] Основы статистической биогиродинамики. - М.: Наука, 1976, 167 с.

Русецкий А.А. [1] Оборудование и организация гидроаэродинамических лабораторий. - Л.: Судостроение, 1975, 152 с.

Русецкий А.А. [2] Движители судов с динамическими принципами поддержания - Л.: Судостроение, 1979, 240 с.

Русецкий А.А., Жученко М.М., Дубровин О.В. [1] Судовые движители. - Л.: Судостроение, 1971, 288 с.

Савченко Ю.Н. [1] Оптимальная кинематика машущего движителя и резонансные режимы плавания животных. - В сб.: Бионика (Киев), 1975, № 9, 106-112.

Савченко Ю.Н., Савченко В.Т. [1] Бионические аспекты плавания животных. - В сб.: Гидродинамические вопросы бионики. Киев, 1983, 46-57, - РЖМех, 1984, 2Г872.

Седов Л.И. [1] Плоские задачи гидродинамики и аэродинамики. - М.: Наука, 1966, 446 с.

Семенов Б.Н. [1] О существовании гидродинамического феномена дельфина афалины. - В сб.: Бионика (Киев), 1969, № 3, 54-61.

Семенов Н.П., Бабенко В.В., Каян В.П. [1] Экспериментальные исследования некоторых особенностей гидродинамики плавания дельфинов. - В сб.: Бионика (Киев), 1974, № 8, 23-31.

Соколов В.Е. [1] Кожные покровы млекопитающих. - М.: Наука, 1973, 487 с.

Соколов В.Е., Бурлаков В.Д., Грушанская Ж.Я. [1] Теоретический чертеж черноморского дельфина афалины. - Бюл. Моск. о-ва испыт. природы, Отд. биол., 1972, 77, № 6, 45-53.

Сорокодум Е.Д. [1] О природе волнообразных колебаний тел рыб. - Докл. АН СССР, 1984, 278, № 3, 571-574.

Ускова Е.Т., Раевский В.С., Момот Л.Н., Усков И.А. [1] Сравнительное изучение гидродинамической эффективности

растворов полиоксиэтилена и кожных выделений морских животных. - В сб.: Бионика (Киев), 1975, № 9, 90-92.

Ускова Е.Т., Шмырев А.Н., Раевский В.С., Богданова Л.Н., Момот Л.Н., Беляев В.В., Усков И.А. [1] О природе и гидродинамической активности глазных выделений дельфинов. - В сб.: Бионика (Киев), 1983, № 17, 72-75.

Федяевский К.К., Фомина Н.Н. [1] Исследование обтекания толстого крыла малого удлинения с плоскими и закругленными торцами. - В кн.: К.К. Федяевский. Избр. тр. - Л.: Судостроение, 1975, 294-312.

Черный И.М., Сирый В.С. [1] Гидродинамический анализ пульсирующего двигателя прерывно-циклического действия. - В сб.: Гидромеханика (Киев), 1976, № 34, 20-30.

Яблоков А.В., Белькович В.М., Борисов В.И. [1] Киты и дельфины. - М.: Наука, 1972, 472 с.

Шулейкин В.В. [1] Аэродинамика летучей рыбки. - Изв. АН СССР, 1928, 573-582.

Akira O., Wataru S., Tadashi I., Toshiro K. [1] Studies on the schooling behavior of fish. V. Note on the dynamics of fish schooling. - Nippon suisan gakkaiishi. Bull. Jap. Soc. Sci. Fish., 1977, 43, № 12, 1369-1377.

Amsden R.C. [1] Design requirements of agricultural aircraft. - Aeronaut. J., 1980, № 6, 144-146.

Blake R.W. [1] Energetics of leaping in dolphins and other aquatic animals. - J. Mar. Biol. Assoc. U. K., 1983, 63, № 1, 61-70 - ПЖ Mex, 1983, 6Г715.

Blake R.W. [2] Mechanics of gliding in birds with special reference to the influence of the ground effect. - J. Biomech., 1983, 16, № 8, 649-654 - ПЖ Mex, 1984, 3Г738.

Blick E.F. [1] The aerodynamics of birds. - AIAA Stud. J., 1976, Summer, 4-9.

Bramwell Ch.D. [1] Aerodynamics of Pteranodon. - Biol. J. Linn. Soc., 1971, 3, № 4, 313-328 - ПЖ Mex, 1972, 5Б 411.

Bushnell D.M., Hefner J.N., Ash R.L. [1] Effect of compliant wall motion on turbulent boundary layers. - Phys. Fluids, 1977, 20, № 10, 31-48 - ПЖ Mex, 1978, 3Б 125.

Caple G., Balda R.P., Williams W.R. [1] The physics of leaping animals and the evolution of preflight. - Amer. Natur., 1983, 121, № 4, 455-476 - ПЖ Mex, 1983, 9Г649.

Chamberlaine J.A. [1] Motor performance and jet propulsion in the cephalopod Nautilus pompilius. - J. Biomech., 1983, 16, № 4, 279-285 - ПЖ Mex, 1983, 11Г559.

Chance M.A.C. [1] Air flow and the flight of a noctuid moth.

- In: *Swimming and flying in nature*. New York, London: Plenum Press., 1975, 829-843.

Chang P. K. [1] Control of flow separation. - Washington: Hemisphere Corp., 1976. Перевод: ЧЖЕН П. Управление отрывом потока. - М.: Мир, 1979, 552 с.

Cheng H. K., Murillo L. E. [1] Lunate-tail swimming propulsion as a problem of curved lifting line in unsteady flow. P. 1. Asymptotic theory. - *J. Fluid Mech.*, 1984, 143, 327-350 - *РЖ Mex*, 1984, 12Б823.

Ellington C. P. [1] Aerodynamics of hovering insect flight. I. The quasi-steady analysis. - *Phil. Trans. Roy. Soc. London*, 1984, B305, 1-21 - *РЖ Mex*, 1984, 8Г585.

Ellington C. P. [2] Aerodynamics of hovering insect flight. II. Morphological parameters. - *Phil. Trans. Roy. Soc. London*, 1984, B305, 22-40 - *РЖ Mex*, 1984, 8Г586.

Ellington C. P. [3] Aerodynamics of hovering insect flight. III. Kinematics. - *Phil. Trans. Roy. Soc. London*, 1984, B305, 41-78 - *РЖ Mex*, 1984, 8Г587.

Ellington C. P. [4] Aerodynamics of hovering insect flight. IV. Aerodynamic mechanisms. - *Phil. Trans. Roy. Soc. London*, 1984, B305, 79-113 - *РЖ Mex*, 1984, 8Г588.

Ellington C. P. [5] Aerodynamics of hovering insect flight. V. A vortex theory. - *Phil. Trans. Roy. Soc. London*, 1984, B305, 115-144 - *РЖ Mex*, 1984, 8Г589.

Ellington C. P. [6] Aerodynamics of hovering insect flight. VI. Lift and power requirements. - *Phil. Trans. Roy. Soc. London*, 1984, B305, 145-181 - *РЖ Mex*, 1984, 8Г590.

Ellington C. P. [7] The aerodynamics of normal hovering flight: three approaches. - In: *Instationäre Effekte an schwingenden Tierflügeln*. Wiesbaden, 1980, 64-101.

Ellington C. P. [8] Vortices and hovering flight. - In: *Comparative physiology - water ions and fluid mechanics*. Cambridge: Univ. Press., 1977, 327-345.

Ellington C. P. [9] The aerodynamics of flapping animal flight. - *Amer. Zool.*, 1984, 24, № 1, 95-105 - *РЖ Mex*, 1984, 11Б721.

Ferrari C. [1] Consideration of fish locomotion. - *Meccanica.*, 1975, 10, № 4, 300-311 - *РЖ Mex*, 1977, 6А190.

Focke H. [1] Über die Ursachen der hohen Schwimgeschwindigkeiten der Delphine. - *Z. Flugwiss.*, 1965, № 2, 54-61.

Gad-El-Hak M., Blackwelder R. F., Riley J. J. [1] On the interaction of compliant coatings with boundary layer flows. - *J. Fluid Mech.*, 1984, 140, 257-280.

- Gibbs-Smith C.H. [1] Sir George Cayley's aeronautics. - London, 1962, 101 p.
- Goodson R.E. [1] Optimization procedures for drag reduction. - Nav. Res. Reviews, 1974, 27, № 7, 11-19.
- Goldschmied F.R. [1] Integrated hull design, boundary layer control and propulsion of submerged bodies: wind-tunnel verification. - AIAA Pap., 1982, № 1204, 1-18.
- Gray J. [1] Studies on animal locomotion. VI: The propulsive powers of the dolphin. - J. Exp. Biol., 1936, 13, № 2, 192-199.
- Gray J. [2] The flight of animals. - Ann. Rept. Board Regents Smithsonian Inst. 1954-1955. Publ. 4190, 1955, 285-303.
- Gray J. [3] How animals move. - Cambridge: Univ. Press., 1957, 1-114.
- Gray J. [4] Animal locomotion. - London: Weidenfeld and Nicolson, 1968, 479 p.
- Grosskreutz R. [1] Wechselwirkungen zwischen turbulenten Grenzschichten und weichen Wänden. - Mitt. M.-Planck-Inst. Strömungsforsch. und Aerodyn. Versuchsanst., 1971, № 53, 85S. - PЖ Mex, 1972, 2B731.
- Hertel H. [1] Structure, form, movement. - New York: Reinhold Publ. Corp., 1966, 250 p.
- Hoyt J.W. [1] Hydrodynamic drag reduction due to fish sliminess. - In: Swimming and flying in nature. New York: Plenum Press, 1975, 653-672. Перевод: Хойт Дж. Снижение гидродинамического сопротивления рыбой слизью - В сб.: Механика. Нов. в зарубеж. науке (Москва), 1980, № 23 (Биогидродинамика плавания и полета), 128-145.
- Hunt J.C.R. [1] Some connection between fluid mechanics and the solving of industrial and environmental fluid-flow problems. - J. Fluid Mech., 1981, 106, 103-131. Перевод: Хант Дж. Некоторые связи между гидромеханикой и решением возникающих в промышленности и в сфере окружающей среды задач, касающихся движения жидкости. - В сб.: Современная гидродинамика. Успехи и проблемы. М., 1984, 147-185.
- Jakobsen E. [1] The working principle of the foil propeller. - Norw. Shipp. News, 1983, 39, № 5, 68-69 - PЖВодн. тр., 1983, 12A165.
- Katz J., Weihs D. [1] Hydrodynamic propulsion by large amplitude oscillation of an airfoil with chordwise flexibility. - J. Fluid Mech., 1978, 88, № 3, 485-497.
- Kelly H.R., Rentz A.W., Sieckmann J. [1] Experimental studies on the motion of a flexible hydrofoil. - J. Fluid Mech., 1964, 19, № 1, 30-48.

Kramer M.G. [1] Boundary layer stabilization by distributed damping. - J. Amer. Soc. Naval Eng., 1960, 72, № 1, 25-33.

Lan C.E. [1] The unsteady quasi-vortex lattice method with application to animal propulsion. - J. Fluid Mech., 1979, 93, № 4, 747-765.

Lang Th.G. [1] Hydrodynamic analysis of dolphin fin profiles. - Nature, 1966, № 209, 5029.

Lang Th.G. [2] Hydrodynamic analysis of cetacean performance. - In: Whales, dolphins and porpoises. Berkeley; Los Angeles, 1966, 341-396.

Lang Th.G., Pryor K. [1] Hydrodynamic performance of porpoises (*Stenella attenuata*). - Science, 1966, № 152, 3721-3723.

Laser O. [1] Fin propulsion boat. Пат. 4345903 США. Заявл. 27.05.80, № 152995, опубли. 24.08.82. МКИ 63, Н 25/06, ИКИ 440/14 - РЖ Водн. тр., 1983, 7A136.

Lewin R. [1] How did the vertebrates take to the air. - Science, 1983, 221, № 4605, 38-39 - РЖ Мех, 1983, 12Г832.

Lighthill M.J. [1] Aerodynamic aspects of animal flight. - In: Swimming and flying in nature. New York: Plenum Press, 1975, 423-491. Перевод: Лайтхилл Дж. Аэродинамические аспекты полета животных. - В сб.: Механика. Нов. в зарубеж. науке (Москва), 1980, № 23 (Биогидродинамика плавания и полета), 9-78.

Lighthill M.J. [2] Aquatic animal propulsion of high hydro-mechanical efficiency. - J. Fluid Mech., 1970, 44, № 2, 265-301.

Lighthill M.J. [3] Large-amplitude elongated body theory of fish locomotion. - Proc. Roy. Soc. London, 1971, B179, № 1055, 125-138.

Lighthill M.J. [4] Aquatic animal locomotion. - Trans. N. E. Coast Inst. Eng. and Shipbuild., 1977, 93, № 6, 127-135.

Lissaman P. B.S., Harris G.L. [1] Turbulent skin friction on compliant surfaces. - AIAA Journal, 1969, 7, № 8, 1625-1627 - РЖ Мех, 1970, 3Б863.

Lukašik Z. [1] Możliwość wykorzystania bioniki dla podwyższenia parametrów ruchu statku. - Budown. okręt., 1979, 24, № 1, 5-6 - РЖ Водн. тр., 1980, 6A122.

Maxworthy T. [1] Experiments on the Weis-Fogh mechanism of lift generated by insects in hovering flight. - J. Fluid Mech., 1979, 93, № 1, 47-63.

Murakami T. [1] Study on the hydrodynamic characteristics of circular type submarine. - J. Soc. Nav. Archit. Jap., 1973, 133, 23-31.

Nachtigall W. [1] *Biotechnik und Bionik - Fachübergreifende Disziplinen der Naturwissenschaft.* - Abh. Akad. Wiss. und Lit. Math.-naturwiss. Kl., 1982, № 1, 1-29 - ПЖ Mex, 1983, 10Г709.

Neuhaus W., Bretting H., Schweizer B. [1] *Morphologische und funktionelle Untersuchungen über den "lautlosen" Flug der Eulen (Strix aluco) im Vergleich zum Flug der Enten.* - Biol. Zbl., 1973, № 92, 495-512.

Niiler P. P., White H. J. [1] *Note on the swimming deceleration of a dolphins.* - J. Fluid Mech., 1969, 38, № 3, 613-617 - ПЖ Mex, 1970, 3В564.

Parkin C.S., Spillman J.J. [1] *The use of wing-tip sails on a spraying aircraft to reduce the amount of material carried off-target by a cross-wind.* - J. Agr. Eng. Res., 1980, 25, № 1, 65-74.

Parrott G.Chr. [1] *Aerodynamics of gliding flight of a black vulture.* - J. Exp. Biol., 1970, 53, № 2, 363-374.

Pennycuik C.J. [1] *Gliding flight of the white-backed vulture Gyps africanus.* - J. Exp. Biol., 1971, 55, № 1, 13-38 - ПЖ Mex, 1972, 1В367.

Pironneau O., Katz D.F. [1] *Optimal swimming motions of flagella.* - In: *Swimming and flying in nature.* New York: Plenum Press, 1975, 161-172. Перевод: Пиронно О., Кац Д. *Оптимальное плавание жгутиковых.* - В сб.: *Механика. Нов. в зарубеж. науке (Москва), 1980, № 23 (Биогидродинамика плавания и полета), 146-156.*

Pryor K. [1] *Lads before the wind.* - New York e.a.: Harper and Row Publ., 1975, 280 p. Перевод: Прайор К. *Несущие ветер.* - М.: Мир, 1981, 304 с.

Rayner J.M.V. [1] *A vortex theory of animal flight. 1. The vortex wake of a hovering animal.* - J. Fluid Mech., 1979, 91, № 4, 697-730.

Rayner J.M.V. [2] *Vorticity and animal flight.* - In: *Aspects of animal movement.* Symp. Cambridge: Univ. Press, 1978, 177-200.

Savage S.B., Newman B.G., Wong D.T.-M. [1] *The role of vortices and unsteady effects during the hovering flight of dragonflies.* - J. Exp. Biol., 1979, 83, 59-77.

Spillman J.J. [1] *The use of wing-tip sails to reduce vortex drag.* - *Aeronaut. J.*, 1978, 82, № 809, 387-395.

Spillman J.J., McVitie A.M. [1] *Wing tip sails which give lower drag at all normal flight speeds.* - *Aeronaut. J.*, 1984, 88, № 878, 362-369.

Susumo H. [1] *The propulsive powers of the dolphin* - J. Kansai Soc. Naval Archit. Japan, 1972, № 145, 37-45.

Taneda S., Tomonari Y. [1] An experiment on the flow around a waving plate. - J. Phys. Soc. Jap., 1974, 36, № 6, 1683-1689.

Toms B.A. [1] Some observations on the linear solutions of the flow through straight tubes at large Reynolds numbers. - Proc. 1st Int. Congr. Rheol.; Amsterdam, 1948, № 2, 135-141.

Tsutahara M., Kimura T. [1] Aerodynamic characteristics of the Weis-Fogh mechanism. - Нихон коку утю гаккайси. J. Jap. Soc. Aeronaut. and Space Sci., 1984, 32, № 362, 154-162 - PЖ Mex, 1984, 11B724.

Voß W. [1] Energieumwandlung durch Flossenantriebe. Eine experimentelle Untersuchung von technischen Flossen. - Fortschr. Ber. VDI Z., 1982, R.12, № 42, 191-197 - PЖ Mex, 1984, 41'675.

Walsh M.J. [1] Turbulent boundary layer drag reduction using riblets. - AIAA Pap., 1982, № 169, 8 p. Перевод: Уолш М.Д. Сопротивление пластины с продольными пазами и ребрами. - В сб.: Снижение вязкостного трения. М., 1984, 189-206.

Weihls D. [1] Mechanically efficient swimming techniques for fish with negative buoyancy. - J. Mar. Res., 1973, 31, № 3, 194-209.

Weis-Fogh T. [1] Energetics and aerodynamics of flapping flight: a synthesis - In: Insect flight. Oxford e.a., 1976, 48-72 - PЖ Mex, 1977, 7A215.

Weis-Fogh T. [2] Flapping flight and power in birds and insects, conventional and novel mechanisms. - In: Swimming and flying in nature. New York; London: Plenum Press, 1975, 729-762.

Wilkie D.R. Man as an aero engine. - J. Roy. Aeron. Soc., 1960, № 64, 22-25.

Wu T.Y. [1] Hydromechanics of swimming propulsion. Part 1. Swimming of a two-dimensional flexible plate at variable forward speeds in an inviscid fluid. - J. Fluid Mech., 1971, 46, № 2, 337-355.

Wu T.Y. [2] Hydromechanics of swimming propulsion. Part 2. Some optimum shape problems. - J. Fluid Mech., 1971, 46, № 3, 521-544.

Wu T.Y. [3] Hydromechanics of swimming propulsion. Part 3. Swimming and optimum movements of slender fish with side fins. - J. Fluid Mech., 1971, 46, № 3, 545-568.

Wu T.Y. [4] Introduction to the scaling of aquatic animal locomotion - In: Scale effects in animal locomotion. London: Acad. Press, 1977, 203-232. Перевод: Ву Т. О масштабном эффекте для передвижения водных животных. - В сб.: Механика. Нов. в зарубеж. науке (Москва), 1980, № 23 (Биогидродинамика плавания и полета), 79-112.

Wu T.Y., Chwang A.T. [1] Extraction of flow energy by fish and birds in a wave stream. - In: Swimming and flying in nature. New York: Plenum Press, 1975, 687-702. Перевод: Бу Т., Чуонг А. Получение рыбами и птицами энергии из волнового потока. - В сб.: Механика. Нов. в зарубеж. науке (Москва), 1980, № 23 (Биогидродинамика плавания и полета), 113-127.

Моригава Х. [1] - Юацу то кукиацу. J. Jap. Hydraul. and Pneum. Soc., 1983, 14, № 3, 176-184 (яп.) - РЖ Водн. тр., 1983, 12A164.

4.1. Внутренняя перестройка	78
4.2. Поверхностная перестройка	81
Глава 6. Механические и механо-химические модели морфогенеза	84
§ 1. Некоторые общие биофизические концепции, Представление об участии механических полей в индивидуальном развитии	84
§ 2. Потеря механической устойчивости как механизм морфогенеза. Другие формообразующие факторы чисто механической природы	89
§ 3. Механизмы формообразования, основанные на совместном действии механических и физико-химических полей	92
Глава 7. Некоторые вопросы роста опухолей	100
Заключение	104
Литература	107

Ж.Я. Грушанская, А.И. Короткин

НЕКОТОРЫЕ ПРОБЛЕМЫ БИОЛОГИЧЕСКОЙ ГИДРО- И АЭРОДИНАМИКИ

Введение	143
Глава 1. Геометрические и гидродинамические характеристики морских животных	146
1.1. Геометрические и гидродинамические характеристики китообразных	146
1.2. Геометрические и гидродинамические характеристики рыб	153
Меченосные рыбы	154
Летучие рыбы	155
Черноморские скаты	157
Глава 2. "Парадокс Грея" и связанные с ним проблемы определения скорости, сопротивления и мощности морских животных	159
2.1. Скорости движения дельфинов	160
2.2. Мощность дельфинов	166
2.3. Сопротивление воды движению дельфина	169
Глава 3. Взаимодействие кожных покровов морских животных с потоком жидкости	177
3.1. Упругие и демпфирующие свойства поверхности	174

3.2.	Влияние бегущей волны на сопротивление поверхности	177
3.3.	Уменьшение сопротивления трения путем введения в пограничный слой высокомолекулярных соединений	179
3.4.	Образование на обтекаемой поверхности специальных систем элементов шероховатости	179
Глава 4.	Двигатели водных животных	182
4.1.	Плавниковый двигатель	183
4.2.	Волновой двигатель	187
4.3.	Гидрореактивный двигатель	190
Глава 5.	Аэродинамика полета птиц	192
Глава 6.	Аэродинамика полета насекомых	204
	Литература	210
	Указатель к предыдущим томам серии	225

Технический редактор Н.Ю. Сорокина Корректор О.А. Перфилова

Сдано в набор 27.06.85	Подписано в печать 12.09.85
Формат 60 x 90 1/16	Бум. офс. № 2 Печать офсетная
Усл.печ.л. 14,25	Усл.кр-отг. 14,50 Уч.-изд.л. 13,74
Тир. 375 экз.	Зак. 5007 Цена 1р.50к.

Адрес редакции: 125219, Москва, А-219, Балтийская ул., 14
Тел. 155-44-73

Производственно-издательский комбинат ВИНТИ
140010, Люберцы 10, Московской обл.,
Октябрьский проспект, 403

С.А. Регирер, А.А. Штейн. Механические аспекты процессов роста, развития и перестройки биологических тканей.

"Итоги науки и техн. ВИНТИ. Сер. Комплексные и специальные разделы механики", 1985, 1, с. 3-142

Обзор посвящен широкому классу механических движений, происходящих в развивающейся живой материи на разных уровнях ее организации. Внимание сосредоточено на наблюдениях и экспериментальных данных, которые могут быть полезны для последующих теоретических работ в этой области; рассмотрено также современное состояние теоретических концепций и математического моделирования.

Главные вопросы, разбираемые подробно: кинематика растущего континуума; массоперенос в растущих тканях; механическая адаптация (ремоделирование) костей и стенок кровеносных сосудов; механика движения, деления и роста клетки в ткани и в культуре; континуальные механические модели адаптации, роста и морфогенеза. Кратко рассмотрены некоторые смежные вопросы с целью дать более полное представление о проблеме в целом. Например, обсуждаются отдельные патологические процессы, включая рост опухолей.

Показано, что во многих реальных ситуациях механические напряжения (в обобщенном смысле) могут быть важны для функциональной адаптации, роста и морфогенеза как макроскопический регулирующий и организующий фактор, который действует через посредство клеточных и иных микроуровневых механизмов. Эти напряжения в тканях возникают за счет различных внешних сил и внутренних процессов, включая сами ростовые явления.

УДК 531/534:57

Ж.Я. Грушанская, А.И. Короткин. Некоторые проблемы биологической гидро- и аэродинамики.

"Итоги науки и техн. ВИНТИ. Сер. Комплексные и специальные разделы механики", 1985, 1, с. 143-224

Настоящий обзор посвящен рассмотрению основных вопросов биологической гидро- и аэродинамики, которые обсуждались в отечественной и зарубежной литературе в период с 1970 по 1984 гг. Главное внимание уделено работам, в которых исследовались геометрические и гидродинамические ха-

рактеристики морских млекопитающих, рыб и птиц. Обсуждается круг вопросов, связанных с "парадоксом" Грея и с работой плавникового движителя. При разборе каждой из конкретных проблем освещается аспект возможного использования особенностей строения и передвижения живых объектов в технических приложениях.

UDC 531/532:576.72

S.A. Regirer, A.A. Stein. Mechanical aspects of growth, development, and remodeling processes in biological tissues. "Advances in Science and Technology of VINITI (Itogi Nauki i Tekhniki VINITI). Ser. Complex and Special Sections of Mechanics", 1985, 1, p. 3-142

The review deals with a broad class of mechanical motions occurred on various levels of organization in developing living matter. Attention is centered on observations and experimental findings which can be useful for future theoretical work in this field. Present status of theoretical concepts and mathematical simulation is also considered.

The following main topics are discussed in detail: kinematics of growing continua; mass transfer in growing tissues; mechanical adaptation (remodeling) of bones and blood vessel walls; mechanics of cellular motion, division, and growth both in living tissue and in culture; continual mechanical models of adaptation, growth and morphogenesis. Some additional aspects are considered briefly in order to give a more complete view on the problem as a whole. For instance, certain pathological processes including tumor growth are discussed.

It is shown that in many real situations mechanical stresses (in various forms) can be of importance for tissue functional adaptation, growth, and morphogenesis as a macroscopic regulatory and organizing factor acting via cellular and other microscale mechanisms. These stresses in a tissue are generated by a variety of external forces and internal processes including growth itself.

Zh.Ya. Grushanskaya, A.I. Korotkin. Some problems of biological hydro- und aerodynamics. "Advances in Science and Technology of VINITI (Itogi Nauki i Tekhniki VINITI). Ser. Complex and Special Sections of Mechanics", 1985, 1, p.143-224

A survey of literature on general problems of biological hydro- and aerodynamics is presented. It deals with sources published during the period since 1970. The interest of the authors is focussed mainly on geometrical and hydrodynamic characteristics of sea mammals, fishes, birds, and insects. Gray's paradox and the hydrodynamics of foil propellers are also considered. The discussion of each particular problem is followed by studying the possible use of results in technology.