

УДК 591.4:599:533: 591.173:62.004.13

ГИДРОДИНАМИЧЕСКИЙ ДИЗАЙН СПИННЫХ ПЛАВНИКОВ ЧЕРНОМОРСКИХ ДЕЛЬФИНОВ

Павлов В.В., Мартынюк В.С.

Обитатели моря, обладающие высокими скоростными качествами, демонстрируют морфологические особенности, связанные с созданием мощной силы тяги, высокой эффективностью движения и низким уровнем сопротивления [1]. Для дельфинов эти морфологические характеристики включают в себя обтекаемую форму тела, специфическое строение кожного покрова, сжатый с боков хвостовой стебель и плавники, имеющие крыловидную форму [2 – 12].

Плавники дельфинов выполняют функции создания силы тяги, контроля устойчивости движения и терморегуляции. Кроме того, форма плавников дельфинов у некоторых видов связана с половым диморфизмом и выполняет сигнальную функцию в социальном поведении дельфинов. С точки зрения биомеханики, лопасти хвостового плавника функционируют как пара крыльев [13]. Однако, в отличие от жестких крыльев самолётов, хвостовой плавник совершает машущие движения для создания силы тяги, связанной с подъёмной силой. Грудные плавники дельфинов функционируют как подводные крылья, контролируемые моменты сил, вызывающие крен, рысканье и вращение тела дельфина. Контроль этих моментов важен для поддержания стабильности во время плавания и маневрирования дельфина. Положение спинного плавника позади центра тяжести дельфина играет важную роль в поддержании стабильности движения [14, 15]. Спинной плавник также предотвращает крен и рысканье, а также занос тела дельфина во время выполнения маневра.

Гидродинамический дизайн плавников дельфинов является объектом исследования в различных областях прикладной науки. Точная характеристика сложной формы спинного плавника дельфинов необходима для развития метода фотоидентификации в исследованиях экологии и поведения дельфинов, разработки новых рулевых поверхностей для самоходных подводных аппаратов, а также создания новых телеметрических устройств, обладающих низким сопротивлением. В связи с этим, целью настоящего исследования явился анализ формы плавников дельфина с помощью аэродинамических параметров для определения эффективности плавника как подводного крыла.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Исследование контура и формы сечений спинных плавников проводилось на 19 особях трех подвидов дельфинов, обитающих в Черном море: афалины

черноморской *Tursiops truncatus ponticus* (Delphinidae) – 5 особей, белобочки черноморской *Delphinus delphis ponticus* (Delphinidae) – 6 особей, черноморской морской свиньи *Phocoena phocoena ponticus* (Phocoenidae) – 8 особей. Для описания формы плавников в плане, т.е. контура плавников, использовались показатели стреловидности передней кромки плавника и относительного удлинения плавника AR . Для расчета угла стреловидности измерялась длина корневой хорды плавника, т.е. расстояние от нижней границы передней кромки плавника до задней кромки. Затем на расстоянии одной четверти длины корневой хорды от передней кромки откладывался перпендикуляр к корневой хорде плавника до пересечения его с передней кромкой. В точке пересечения измерялся угол между касательной к передней кромке плавника и корневой хордой. Относительное удлинение плавника рассчитывалось как $AR=H^2/S$, где H^2 – квадрат размаха плавника, S – площадь плавника в плане. Кроме того, рассчитывался индекс отклонения плавника по формуле:

$$CI = (L^2 - H^2)1/2/CLr^2,$$

где L – длина от начала передней кромки плавника до его вершины, H – размах плавника, CLr – длина корневой хорды плавника. Измерения проводились на фотографиях плавников дельфинов с помощью программы анализа изображений Image Pro.

На сечениях плавников измерялись основные параметры профиля крыла: длина хорды профиля L , т.е. расстояние от наиболее удаленных точек передней и задней кромки профиля, радиус передней кромки профиля r , максимальная толщина профиля MT , а также расстояние от передней кромки до точки максимальной толщины профиля PMT (рис. 1). Для проведения измерений выполнялась следующая последовательность действий: Плавники дельфинов были иссечены шестью поперечными сечениями, проведенными на равном расстоянии друг от друга. Фотографии сечений были записаны в виде графических файлов в формате JPG в цветовой палитре RGB с разрешением 300 точек на дюйм. На каждой фотографии вместе с сечением плавника была отснята линейка, с помощью которой в дальнейшем производилась калибровка фотографий. Контуры сечений на откалиброванных фотографиях фиксировались с помощью сплайновой кривой в пакете автоматизированного проектирования AutoCad. XY-координаты точек сплайна, описывающего контур сечения, использовались в дальнейшем для расчета абсолютных и относительных значений L , r , MT и PMT .

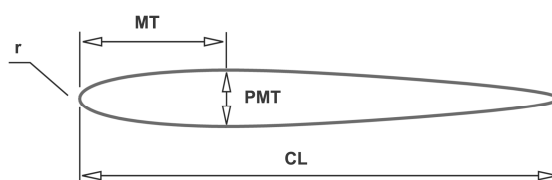


Рис. 1. Основные параметры профиля крыла. L – длина профиля, MT – максимальная толщина профиля, PMT – расстояние от максимальной толщины профиля до передней кромки крыла, r – радиус передней кромки крыла.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Спинной плавник дельфинов имеет сложную трехмерную форму, близкую к форме крыла, которая описывается основными параметрами крыла и его сечений, принятыми в аэродинамике. Плавники исследованных видов дельфинов имеют существенные различия в абсолютных размерах, сохраняя при этом некоторые общие закономерности строения. Треугольная форма спинного плавника морской свиньи имеет существенные отличия от удлиненной серповидной формы плавников афалины и белобочки. Средняя величина относительного удлинения спинного плавника морской свиньи равна $0,73 \pm 0,05$, что достоверно ниже средних величин этого же показателя у афалины и белобочки, $1,11 \pm 0,07$ и $1,42 \pm 0,03$ соответственно. В целом, средняя величина относительного удлинения спинного плавника повышалась в ряду морская свинья – белобочка – афалина (Рис. 2).

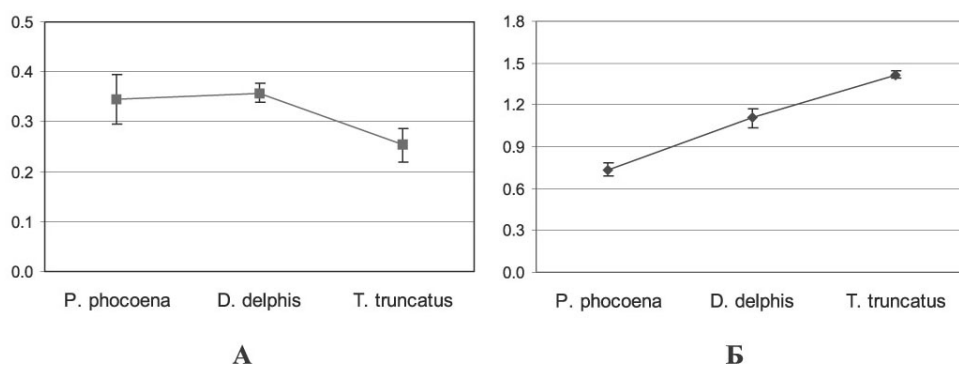


Рис. 2. А - Индекс отклонения спинного плавника морской свиньи, белобочки и афалины, средние ± стандартное отклонение. Б - Относительное удлинение спинного плавника морской свиньи, белобочки и афалины, средние ± стандартное отклонение.

Индекс отклонения плавника имеет отрицательную линейную зависимость от относительного удлинения плавника и уменьшается в том же ряду (рис. 2). При этом средние величины этого показателя не имеют достоверных отличий у морской свиньи и белобочки и равны $0,34 \pm 0,02$ и $0,36 \pm 0,05$ соответственно. Удлиненный спинной плавник афалины достоверно отличается от плавников морской свиньи и белобочки и характеризуется минимальным значением индекса отклонения, равным $0,025 \pm 0,03$.

На фоне заметных отличий в форме плавников, описываемых показателями относительного удлинения и индекса отклонения, угол стреловидности передней кромки практически не отличается у морской свиньи, белобочки и афалины. Средняя величина этого показателя составляет $42 \pm 3^\circ$ у морской свиньи, $45 \pm 2^\circ$ у белобочки и $46 \pm 3^\circ$ у афалины.

Сечения спинных плавников исследованных видов имеют форму, близкую к известным авиационным профилям NASA и EPPLER. Основные отличия сечений плавников от упомянутых авиационных профилей заключаются в утолщенной последней трети сечения, что, по-видимому, связано с биологическими

ограничениями прочности задней кромки плавников. Сечения у основания плавника имеют форму, близкую к профилю NACA 0012, в то время как сечения у верхушки плавника близки к профилю EPPLER 475. Абсолютные значения параметров сечения MT и PMT у плавников морской свиньи, белобочки и афалины уменьшаются от основания плавника к его вершине. В то же время, изменение радиуса передней кромки имеет более сложную закономерность. Характерной особенностью в строении плавников морской свиньи, белобочки и афалины является общий характер изменения параметров сечений плавника от основания плавника к его вершине (рис. 3).

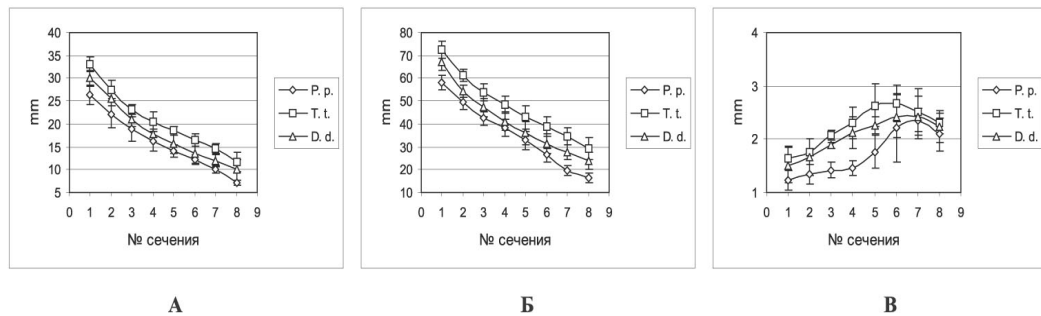


Рис. 3. Распределение основных параметров сечений CL, MT и PMT на спинных плавниках дельфинов, средние \pm стандартное отклонение. А - максимальная толщина сечения, Б - расстояние от передней кромки до максимальной толщины сечения, В - радиус передней кромки. Линии с символами ромба, квадрата и треугольника относятся к параметрам сечений плавников морской свиньи (*Phocoena phocoena*), афалины (*Tursiops truncatus*) белобочки (*Delphinus delphis*) соответственно.

Основным показателем гидро/аэродинамического качества крыла является отношение подъёмной силы к сопротивлению. Сопротивление крыла складывается из сопротивления профиля крыла, связанного с геометрией поперечного сечения крыла и индуцированного сопротивления, связанного с подъёмной силой. Сопротивление профиля возникает вследствие разницы давления на передней и задней кромке крыла и не зависит от подъёмной силы крыла [12]. Спинной плавник дельфинов имеет симметричный профиль поперечного сечения, и подъёмная сила возникает только при постановке плавника под углом к обтекающему потоку. Такие условия возникают при выполнении дельфином маневра.

Форма спинного плавника китов и дельфинов в плане демонстрирует комбинацию относительного удлинения и стреловидности передней кромки, которая способствует увеличению подъёмной силы и снижению сопротивления [9, 16]. Максимальное отношение подъёмной силы к сопротивлению пропорционально корню квадратному из относительного удлинения крыла [12]. Короткий треугольный плавник морской свиньи характеризуется относительно низким значением относительного удлинения. Такая форма плавника предопределяет более низкое отношение подъёмной силы к сопротивлению по сравнению с удлинённой серповидной формой плавника афалины [9]. Большая подъёмная сила,

производимая плавниками с высоким показателем относительного удлинения, делает их более эффективными при выполнении дельфином манёвра. Короткий треугольный спинной плавник морской свиньи обладает меньшей подъёмной силой и может ограничивать возможности манёвра.

Удлиненная форма спинного плавника с низким индексом отклонения наиболее эффективна в снижении индуцированного сопротивления [17]. В этом отношении, плавники афалины и белобочки имеют более совершенный гидродинамический дизайн по сравнению со спинным плавником морской свиньи.

Обтекаемая форма поперечных сечений спинного плавника исследованных видов дельфинов характеризуется тупым, закругленным передним концом, максимальной толщиной сечения, расположенной на отрезке от одной трети до половины сечения, и суживающейся к задней кромке последней трети сечения. Обтекаемый профиль минимизирует сопротивление, уменьшая градиент давления вдоль профиля и обеспечивая безотрывное обтекание [18]. Такой дизайн сечений плавника, с некоторыми вариациями, характерен для плавников китов и дельфинов и близок к авиационным профилям с высокими аэродинамическими характеристиками [16, 19 – 22].

ВЫВОДЫ

1. Форма плавников дельфинов в плане имеет существенные отличия у исследованных видов, что отражает видовую специфику и особенности биологии дельфинов.

2. У всех исследованных видов сечения плавника имеют симметричный профиль, близкий к известным аэродинамическим профилям крыла.

3. Спинные плавники морской свиньи, белобочки и афалины имеют общий характер изменения гидродинамических параметров сечений плавника от основания к вершине плавника.

4. Изменчивость формы плавников, обусловленная видовыми, половыми и возрастными особенностями не превышает морфологических ограничений, обеспечивающих эффективные гидродинамические свойства плавников.

Список литературы

1. Weihs D., Webb P.W. Optimization of Locomotion. Fish Biomechanics. – New York: Praeger. – 1983. – 371 p.
2. Суркина Р.М. Строение соединительнотканного остова кожи дельфина. Механизмы передвижения животных. – Киев: Наукова думка, 1968. – С. 78-86.
3. Соколов В.Е. Структура кожного покрова некоторых китообразных // Бюлл. Моск. о-ва испытателей природы. Отд. биологии. – 1955. – № 6 (60). – С. 45-60.
4. Соколов В.Е., Бурлаков В.Д., Грушанская Ж.Я. Теоретический чертеж черноморского дельфина-афалины // Бюлл. Моск. о-ва испытателей природы. Отд. биологии. – 1972. – № 6 (77). – С. 43-53.
5. Бабенко В.В., Козлов Л.Ф., Першин С.В., Соколов В.Е., Томилин А.Г. Самонастройка демпфирующих свойств кожи китообразных при активном плавании // Бионика. – 1982. – №16. – С. 3-10.
6. Першин С.В. Гидродинамический анализ профилей плавников дельфинов и китов // Бионика. – 1975. – №9. – С. 26-36.
7. Pavlov V.V. Wing design and morphology of the harbor porpoise dorsal fin // J. Morphology. – 2003. – № 258. – P. 284-295.

8. Fish F.E. Imaginative Solutions by Marine Organisms for Drag Reduction // Proc. International Symposium on Seawater Drag Reduction. Newport, RI. 1998: – P. 443-450.
9. Fish F.E, Rohr J.J. Review of Dolphin Hydrodynamics and Swimming Performance. SPAWARS System Center Technical Report 1801, San Diego, CA. 1999. – P 193.
10. Kramer M.O. The Dolphins' Secret // New Sci. – 1960. – № 7. – P. 1118-1120.
11. Videler J.J. Body surface adaptations to boundary layer dynamics / Ellington C.P. and Pedley T.J., ed. Biological fluid dynamics. – Cambridge: Society of Experimental Biology, 1995. – P. 1-20.
12. Webb P.W. Hydrodynamics and energetics of fish propulsion // Bull. Fish. Res. Bd. Can. – 1975. – № 190. – P. 1-158.
13. Vogel S. Life in Moving Fluids. – Princeton: Princeton University Press, 1994. – 257 p.
14. Parry D.A. The Swimming of Whales and a Discussion of Gray's Paradox // J. Exp. Biol. – 1949. – № 26. – P. 24-34.
15. Fish F.E. Biological Designs for Enhanced Maneuverability: Analysis of Marine Mammal Performance // Proc. Tenth International Symposium on Unmanned Untethered Submersible Technology: Special Session on Bio-Engineering Research Related to Autonomous Underwater Vehicles. Lee, 1997: – P. 109-117.
16. Першин С.В. Основы гидробионики. – Ленинград: Судостроение, 1988. – 264 с.
17. van Dam C.P. Efficiency Characteristics of Crescent-shaped Wings and Caudal Fins // Nature. – 1987. – № 325. – P. 435-437.
18. Abbot I.H., von Doenhoff A.E. Theory of Wing Sections. – New York: Dover Publications, 1959. – 465 p.
19. Lang T.G. Hydrodynamic Analysis of Dolphin Fin Profiles // Nature. – 1966. №. 209. – P. 1110-1111.
20. Шпет Н.Г. Особенности формы туловища и хвостового плавника китов // Бионика. – 1975. – №9. – С. 36-41.
21. Грушанская Ж.Я., Короткин А.И., Тюшкевич В.А. Исследование обтекания и гидродинамических характеристик твердых моделей плавников дельфина // Тр. Ленингр. о-ва естествоиспытателей. – 1976. – № 3 (5). – С. 42-52.
22. Fish F.E., Battle J.M. Hydrodynamic Design of the Humpback Whale Flipper // J. Morph. – 1995. – № 225. – P. 51-60.

Поступила в редакцию 22.12.2006 г.