

Kajan, V. P.; Pjateckij, V. E.:

**Die Kinematik der Schwimmbewegung des Großen Tümmlers in Abhängigkeit vom Beschleunigungsmodus**

Deutsche Vollübersetzung aus:

Bionika. Kiev: Izd. Naukova Dumka, 1977, Bd 11, S. 36 - 41.

Russisch:

Кинематика плавания дельфина афалины в зависимости от режима ускорения

Kinematika plavanija del'fina afaliny v zavisimosti ot režima uskorenija

Schon seit langem gilt unser Interesse der Erforschung und Nutzung der hervorragenden natürlichen Besonderheiten der Delfine. Diese hoch spezialisierten Meerestiere sind gut an das permanente Schwimmen mit unterschiedlichen Geschwindigkeiten angepasst. Von allen Meeressäugetieren sind sie die vergleichsweise schnellsten Schwimmer.

Forscher, die zu verschiedenen Zeiten das Schwimmen der Delfine untersucht haben, erklärten den Mechanismus ihrer Bewegungen unterschiedlich, oft sogar widersprüchlich. Ein kurzer historischer Abriss mit Quellnachweisen und Beschreibungen einfachster Experimente zur Bestimmung des Beteiligungsgrades der Fluke an der Erzeugung des Vortriebs findet sich in der Literatur [3].

Im Zusammenhang mit dem Gray-Paradoxon, demzufolge der Widerstand eines Delfins in Bewegung um ein Vielfaches geringer ist als der Widerstand eines in Form und Größe analogen starren Modells, ist besonders die Untersuchung der Anpassungsmechanismen von Interesse, die der Delfin zur mutmaßlichen Verringerung des hydrodynamischen Widerstandes besitzt. Da der Vortrieb des Delfins, der bei gleichmäßiger Bewegung seinem hydrodynamischen Widerstand mit umgekehrtem Vorzeichen entspricht, durch Schlagbewegungen des Schwanzstiels und Flossenblattes mit einem Amplitudenanstieg auf das Maximum am hinteren Rand des Flossenblattes der Fluke erzeugt wird [10], muss man zur Bestimmung des hydrodynamischen Widerstandes dieses Tieres seine kinematischen Bewegungsparameter sehr genau kennen. Es muss darauf hingewiesen werden, dass diese Frage in der Literatur noch nicht ausreichend beleuchtet wurde. Die wenigen Angaben, die wir haben [1; 4; 5; 12 - 14], bilden keine Grundlage für die notwendigen Berechnungen. Bereits früher wurden von uns Daten [7; 8] zur Kinematik des Delfinschwimmens bei geringer Schwimmgeschwindigkeit veröffentlicht, jedoch ohne Zuordnung des Betrags und Vorzeichens der Beschleunigung.

Im folgenden werden die Ergebnisse experimenteller Untersuchungen der Schwimmbewegung von sechs Großen Tümmlern mit einer Länge  $L=2,35 - 2,65 \text{ m}$  vorgestellt. Den Versuchstieren wurde beigebracht auf Kommando einen Arbeitsbereich im Kanal zu durchschwimmen. Im mittleren Teil des Kanals war in einem Bereich mit einem Vielfachen der Tierlänge eine Seitenwand vollständig verglast. Von einer über dem Kanal befindlichen Warte aus wurde bei jedem Durchlauf beim Durchschwimmen des Arbeitsbereiches der Abstand des Delfins von der Seitenwand kontrolliert. Durchgänge, bei denen das Tier zu dicht an einer der Seitenwände vorbeischwamm, wurden nicht berücksichtigt.

Die kinematischen Elemente der Schwimmbewegungen der Versuchstiere wurden mit einer Filmkamera Modell "Konvas-avtomat" mit einer Aufnahme-geschwindigkeit von 30 - 40 Bildern pro Sekunde aufgezeichnet. Es wurden Schwarz-Weiß-Negativfilme vom Typ KN-1, KN-3 und Mikrat-200 mit 35 mm Breite und einer Bildgröße von 16 x 22 mm verwendet und Kameraobjektive vom Typ RO-61 und RO-56 mit einer entsprechenden Brennweite von  $F=28$  und  $F=35$  mm eingesetzt. Um die Zeitabstände zwischen den aufeinanderfolgenden Filmbildern genauer bestimmen zu können, wurde außen an der Glaswand des Kanals ein elektrischer Zeitmesser [9] angebracht, dessen Zeiger innerhalb einer Sekunde zwei vollständige Umdrehungen machte. Dadurch konnte die Zeit mit einer Genauigkeit von 0,005 s abgelesen werden. Der Abstand der Filmkamera von der Glaswand betrug 7,3 m

Für die folgende Arbeit wurden Durchgänge ausgewählt, bei denen eine regelmäßige Schwingung des Schwanzbereiches des Delfinkörpers beobachtet wurde und die Bewegungsbahn des Körperschwerpunktes nahezu geradlinig und annä-

hernd horizontal verlief. Die statistische Auswertung der Filme wurde mit Hilfe eines Dechiffrotors vom Typ "Mikrofit" 5PO-1 mit 16facher Vergrößerung vorgenommen. Der Maßstab des Weges, den der Delfin in Längsrichtung zurücklegte, änderte sich stets, er stieg vom Bildzentrum zum Bildrand um 5 - 10%, was in jedem konkreten Fall berücksichtigt wurde. Die Untersuchungsergebnisse werden in graphischer Form dargestellt.

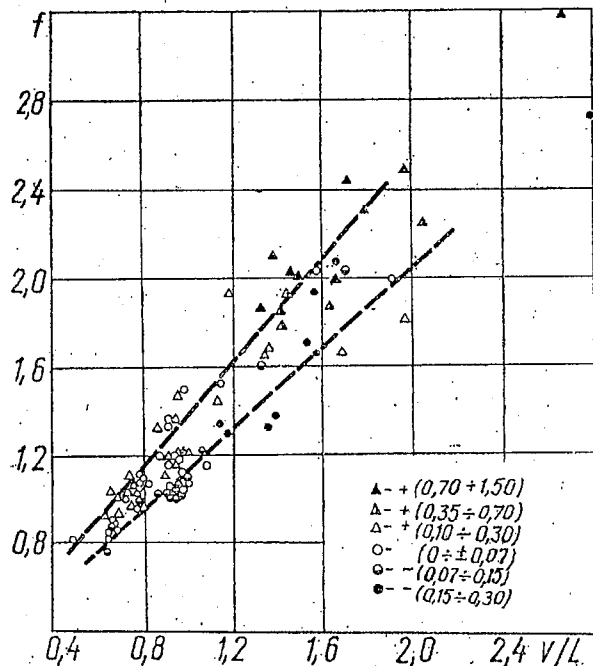


Abb. 1: Abhängigkeit der Frequenz  $f$  der Flukenschwingung von der relativen Geschwindigkeit  $v/L$ . Beschleunigungswerte,  $m/s^2$ : 1. + (0,70-1,50); 2. + (0,35-0,70); 3. + (0,10-0,30); 4.  $0 \pm 0,07$ ; 5. - (0,07-0,15); 6. - (0,15-0,80).

Infolge der instationären Translationsbewegung des Delfins wurden alle Parameter, die die Kinematik der Schwimmbewegung des Tieres charakterisieren, als Mittelwerte innerhalb einer Schwingungsperiode der Fluke bestimmt. Für jede Periode wurde, wie auch schon früher [8], die Abhängigkeit der Schwingungsamplitude  $A_0$  der Gabelung der Schwanzflosse von der Zeit  $t$  bestimmt, woraus der Mittelwert des Wertes  $A_0$  und der Frequenz  $f$  für jede Schwingungsperiode  $T$  ermittelt wurde. Aus der Verschiebung des Massenmittelpunktes des Delfins auf den Filmaufnahmen innerhalb des Zeitraumes  $\Delta t$  wurde seine Geschwindigkeit  $v$  errechnet und  $v=f(t)$  graphisch dargestellt. Anhand dieser Graphiken wurden die Mittelwerte  $v_{Mit}$  für jede Schwingungsperiode der Fluke und die Änderungen der Geschwindigkeit  $v$  ermittelt. Alle aus der graphischen Darstellung gewonnenen Werte  $f$  und  $A_0$  wurden in Abhängigkeit vom Wert und vom Vorzeichen der Geschwindigkeitsänderung innerhalb der betrachteten Schwingungsperiode in Gruppen eingeteilt (die Kennziffern werden in Abb. 1 dargestellt).

Zwischen der Schwingungsfrequenz der Fluke  $f$  und der relativen Geschwindigkeit pro Körperlänge  $v/L$  ist beim Delfin, wie bei vielen Fischen und auch anderen Walen [5, 7, 8], eine lineare Abhängigkeit zu beobachten (Abb. 1.). Die Punktstreuung in Abb. 1 lässt sich dadurch erklären, dass der Vortrieb, der von der schwingenden Fluke des Tieres erzeugt wird, in gleichem Maße sowohl von der Frequenz wie auch von der Amplitude der Flossenschwingungen abhängig ist.

Es lässt sich jedoch feststellen, dass diejenigen Punkte, die einem Schwimmdurchgang des Delfines mit Verzögerung entsprechen, sich unterhalb der Punkte befinden, die einem Schwimmdurchgang mit Beschleunigung entsprechen. Durch erstere kann man  $f = 0,95 \frac{v}{L} + 0,2$  zeichnen, durch zweitere eine Gerade, die durch die Gleichung  $f = 1,2 \frac{v}{L} + 0,1$  beschrieben wird. Nach der Mittelung ließe sich durch alle Punkte der Abb. 1 eine Gerade der Form  $f = 1,1 \frac{v}{L} + 0,15$  führen, die näherungsweise die gleichmäßige Bewegung des Delfins charakterisiert. Einige Unterschiede der ermittelten Relationen  $f(v/L)$  zu den in der Arbeit [8] aufgeführten lassen sich dadurch erklären, dass sie auf der Grundlage der Verarbeitung einer bedeutend größeren Anzahl experimenteller Daten bei bedeutend höheren Schwimgeschwindigkeiten (bis zu 6,5 m/s) gewonnen wurden.

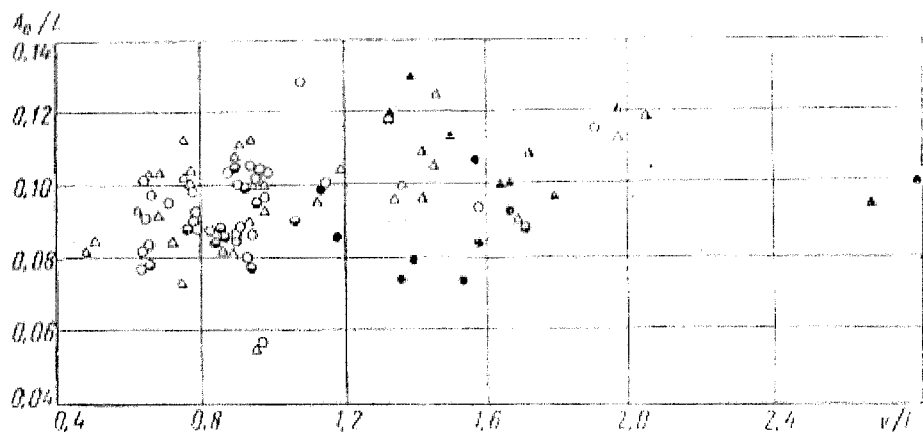


Abb. 2: Abhängigkeit der relativen Amplitude  $A_0/L$  der Flukenschwingung von der relativen Geschwindigkeit  $v/L$ .

Die Kennziffern sind die gleichen wie in Abb. 1.

Eine Reihe von Relationen  $\frac{A_0}{L} \left( \frac{v}{L} \right)$  für unterschiedliche Beschleunigungen wird in Abb. 2 gezeigt, aus der hervorgeht, dass die relative Amplitude beim Schwimmen mit einer Beschleunigung in der Größenordnung von 0,2-0,3 m/s<sup>2</sup> ungefähr um 20-30% größer ist als beim Schwimmen mit einer Verzögerung in der Größenordnung von 0,05-0,15 m/s<sup>2</sup>. Die Kurven der Relationen  $\frac{A_0}{L} \left( \frac{v}{L} \right)$  haben bei ähnlichen Beschleunigungswerten ein ausgeprägtes Maximum bei den Werten im Bereich  $v/L = 0,8 - 0,9$ . Wenn der Beschleunigungsmittelwert der Translationsbewegung des Delfins innerhalb einer Flossenschwingungsperiode nahe Null ist, so hat die relative Amplitude einen Wert der Größenordnung 0,09 - 0,10. Bei  $\frac{v}{L} > 1$  mit steigendem  $v$  und  $f$  verringert sich die Amplitude etwas. Die Abhängigkeit der Strouhalzahl  $Sh = Af/v$ , wobei  $A = 2A_0$  der vollständige Schwingungsausgang der Fluke ist, von der Reynoldszahl  $Re = vL/\nu$  wird in Abb. 3 dargestellt ( $\nu$  ist die kinematische Viskosität, die sich bei unseren Versuchen in einem Bereich von  $0,92 \cdot 10^6$  bis  $1,16 \cdot 10^6$  m<sup>2</sup>/s<sup>2</sup> änderte). Der Anordnungscharakter der experimentellen Punkte bei der

Relation  $Sh=f(Re)$  erinnert qualitativ an die graphische Darstellung der Abhängigkeit der relativen Amplitude von der relativen Geschwindigkeit  $v/L$ , d. h. großen Beschleunigungswerten entsprechen große Strouhalzahlen  $Sh$ , und großen Verzögerungswerten entsprechen kleinere Strouhalzahlen  $Sh$ . Die Kurven  $Sh=f(Re)$  haben für die gleichmäßige Bewegung ebenfalls ein ausgeprägtes Maximum beim Wert  $Re = 4,6 \cdot 10^6$ . Die geringfügige Verringerung der Strouhalzahl  $Sh$  bei steigenden  $v$ -Werten erklärt sich dadurch, dass sich in diesem Fall die Schwingungsamplitude der Schwanzflosse  $A_0$  ebenfalls verringert und dabei einem optimalen Wert nähert, wobei die Werte der Beziehung  $f/v$  für einen Delfin einer bestimmten Länge in etwa konstant sind. Die Verminderung des Vortriebs durch den Schwingungsantrieb, die mit der Verringerung seiner Schwingungsamplitude  $A_0$  in Zusammenhang steht, wird durch den Anstieg der relativen Geschwindigkeit der Transversalbewegung  $u_{Trans}$  der Fluke kompensiert [10], die direkt proportional zur Frequenz  $f$  ist.

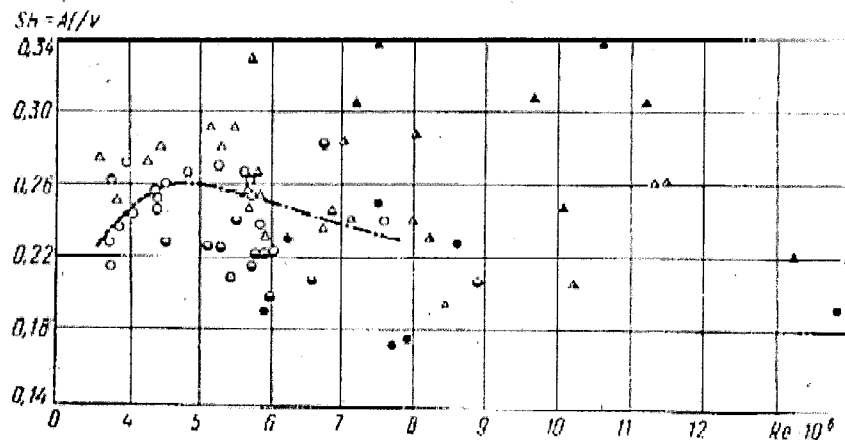


Abb. 3: Abhängigkeit der Strouhalzahl  $Sh$  von der Zahl  $Re$ .

Die Kennziffern sind dieselben wie in Abb. 1.

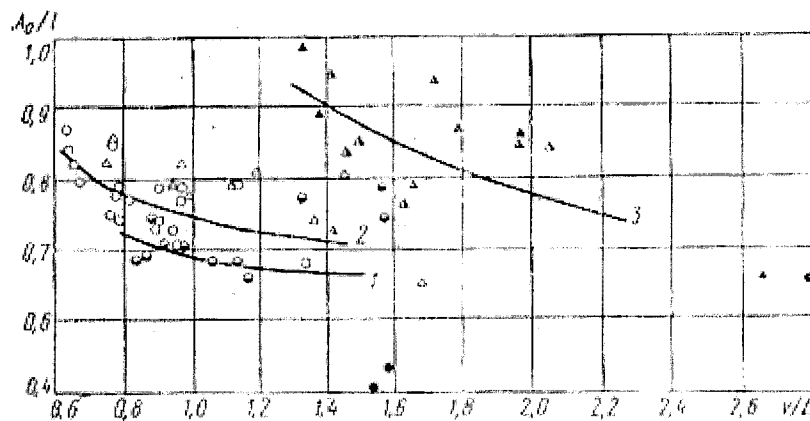


Abb. 4: Abhängigkeit der reduzierten Amplitude  $A_0/l$  des Delfinkörpers von der relativen Geschwindigkeit  $v/L$

Die Kennziffern sind dieselben wie in Abb. 1.

Die Kinematik des Wellenvortriebs wird außer durch die Frequenz  $f$  und die Schwingungsamplitude  $A_0$  der Fluke auch durch die Länge der lokomotorischen Welle  $\chi$  und ihre Ausbreitungsgeschwindigkeit  $c$  entlang des Tierkörpers charakterisiert. Von Interesse ist dabei die Betrachtung folgender kinematischer Parameter der Wellenbewegung: der reduzierten Amplitude  $A_0/l$ , wobei  $l = \chi/2\pi$  ist und  $v/c$  dem

Verhältnis der Geschwindigkeit der Translationsbewegung des Delfins zur Geschwindigkeit der Wellenbewegung entlang des Körpers entspricht. Die Werte für die Wellenlänge der am Körper des Delfins entlang laufenden lokomotorischen Welle  $\lambda$  und für die Ausbreitungsgeschwindigkeit  $c$  dieser Welle entlang des Delfinkörpers wurden anhand von Reihenaufnahmen bestimmt, die für jeden untersuchten Durchgang angefertigt wurden [6].

Abb. 4 zeigt die Abhängigkeit der reduzierten Amplitude  $A_0/l$  von der relativen Geschwindigkeit  $v/L$  des Delfins. Durch die Punktgruppen, die jeweils hohe negative bzw. positive Beschleunigungen charakterisieren, lassen sich die Näherungskurven 1 und 3 zeichnen. Die Punkte für Durchgänge mit Nullbeschleunigung oder geringer positiver Beschleunigung haben eine geringe Streuung und liegen relativ dicht an der Mittelkurve 2 dieser Beziehung. Mit steigender relativer Geschwindigkeit  $v/c$  verringert sich der Wert der reduzierten Amplitude und strebt einen bestimmten optimalen Wert an, der sich für den untersuchten Geschwindigkeitsbereich in den Grenzen von 0,65 bis 0,70 bewegt.

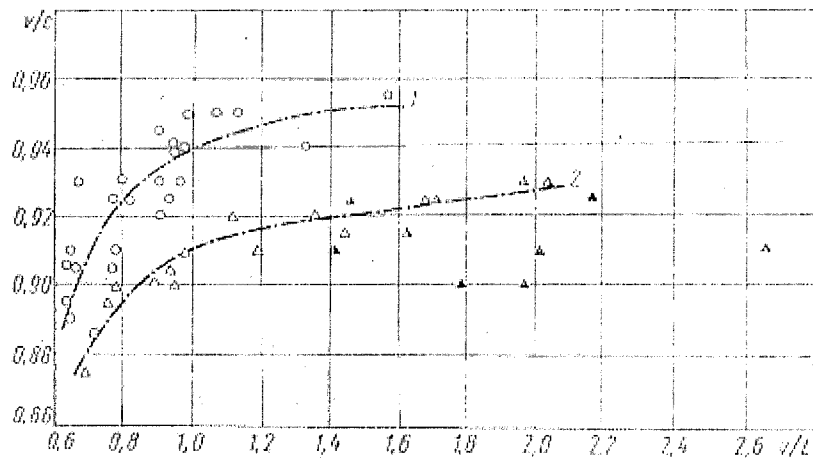


Abb. 5: Abhängigkeit der Relation der Schwimmggeschwindigkeit / Geschwindigkeit der am Körper entlang laufenden Welle  $v/c$  des Delfins von der relativen Geschwindigkeit  $v/L$

Die Kennziffern sind dieselben wie in Abb. 1.

Die Abhängigkeit des Geschwindigkeitsverhältnisses  $v/c$  von der relativen Schwimmggeschwindigkeit  $v/L$  des Delfins wird in Abb. 5 gezeigt. Die Werte der Beziehung  $v/c$  beeinflussen den Vortrieb und den Wirkungsgrad des Schwingungsantriebs durch die stark ausgeprägte sichelförmige Schwanzflosse wesentlich [2]. Aus der Grafik wird ersichtlich, dass die Punkte, die Durchgängen mit nennenswerten positiven Beschleunigungen entsprechen (Kurve 2), deutlich unterhalb der Mittelungskurve liegen, die Durchgängen mit gleichmäßiger Schwimmbewegung des Delfins entspricht (Kurve 1).

Die in diesem Aufsatz gezeigten kinematischen Parameter des Delfinschwimmens mit Biegungs-Schwingungs-Bewegungen des Körpers in der Vertikalebene ermöglichen eine korrekte Bestimmung des Vortriebs [2], der vom Schwingungsantrieb bei Bewegung mit unterschiedlichen Beschleunigungen entwickelt wird. Im Weiteren wird die Ermittlung von Daten von Interesse sein, die aktive Schwimmdurchgänge des Delfins bei Werten von  $Re > 1,5 \cdot 10^7$  charakterisieren.

## Literatur

1. Бабенко, В. В.; Козлов, Л. Ф.; Першин, С. В.: О переменном демпфировании кожи дельфина на различных скоростях плавания. Бионика, 1972, вып. 6, с. 42-52.

Babenko, V. V.; Kozlov, L. F.; Peršin, S. V.: O peremennom dempfirovanii koži del'fina na različnyh skorostjach plavanija. In: Bionika, Kiev: Izd. Naukova Dumka, 1972, vyp. 6, s. 42-52. russ.

/On variable damping of dolphins skin at different speed of swimming; russ./

2. Логвинович, Г. В.: Гидродинамика плавания рыб. Бионика, 1973, вып. 7, с. 3-8.

Loginovič, G. V. : Gidrodinamika plavanija ryb. In: Bionika, Kiev: Izd. Naukova Dumka, 1973, vyp. 7, S. 3-8.

/Hydrodynamik des Schwimmens von Fischen; russ./

3. Нархов, А. С.: О движениях *Delphinus delphis* и *Tursiops tursio* во время плавания. Зоологич. журн., 1939, 18, № 2, с. 326 - 330.

Narchov, A. S.: O dviženijach *Delphinus delphis* i *Tursiops tursio* vo vremja plavanja. In: Zoologičeskij žurnal/ Rossijskaja Akademija Nauk, Otdelenie Obščej Biologii. Moskva: Nauka, 1939, 18, Nr. 2, s. 326 - 330.

/Über die Bewegungen des *Delphinus delphis* und *Tursiops tursio* während des Schwimmens; russ./

4. Першин, С. В.: О резонансном режиме плавания дельфина. Бионика, 1970, вып. 4, с. 31 - 36.

Peršin, S. V.: O rezonansnom režime plavanija del'fina. In: Bionika, Kiev: Izd. Naukova Dumka, 1970, vyp. 4, s. 31 - 36.

/On resonance regime of dolphins' swimming; russ./

5. Першин, С. В.: Гидробиеонические зависимости нестационарного гармонического движения рыб и дельфинов как погруженных тел переменной формы. Проблемы бионики, Москва, 1973, с. 464 - 474.

Peršin, S. V.: Gidrobioničeskie zavisimosti nestacionarnogo garmoničeskogo dviženija ryb i del'finov kak pogružennych tel peremennoj formy. In: Problemy bioniki. Moskva: Nauka, 1973, s. 464 - 474.

/Hydrodynamic dependences in non stationary harmonic motion of fishes and dolphins as submerged bodies with variable shape; russ./

6. Пятецкий, В. Е.: Гидродинамические характеристики плавания некоторых быстроходных рыб. Бионика, 1970, вып. 4, с. 20 - 27.

Pjateckij, V. E.: Gidrodinamičeskie charakteristiki plavanija nekotorych bystrochodnych ryb. In: Bionika, Kiev: Izd. Naukova Dumka, 1970, vyp. 4, S. 20 - 27.

/Hydrodynamic characteristics of swimming of some fast swimming salt-water fish; russ./

7. Пятецкий, В. Е.; Каян, В. П.: Некоторые кинематические характеристики плавания дельфина азовки. Бионика, 1972, вып. 6, с. 18 - 22.  
Pjateckij, V. E., Kajan, V. P.: Nekotorye kinematičeskie charakteristiki plavanija del'fina azovki. In: Bionika, Kiev: Izd. Naukova Dumka, 1972, vyp. 6, s. 18 - 22.  
/Some kinematic characteristics of Phocoena phocoena; russ.
8. Пятецкий, В. Е.; Каян, В. П.: О кинематике плавания дельфина афалины. Бионика, 1975, вып. 9, с. 41 - 46.  
Pjateckij, V. E., Kajan, V. P.: O kinematike plavanija del'fina afaliny. In: Bionika, Kiev: Izd. Naukova Dumka, 1975, vyp. 9, s. 41 - 46.  
/Über die Kinematik der Schwimmbewegungen des Großen Tümmlers; russ./
9. Пятецкий, В. Е.; Каян, В. П., Кравченко, А. М.: Экспериментальные установки, аппаратура и методика изучения гидродинамики плавания водных животных. Бионика, 1973, вып. 7, с. 91 - 102.  
Pjateckij, V. E.; Kajan, V. P.; Kravčenko, A. M.: Éksperimental'nye ustanovki, apperatura i metodika izučenija gidrodinamiki plavanija vodnych životnych. In: Bionika, Kiev: Izd. Naukova Dumka, 1973, vyp. 7, s. 91 - 102.  
Englisch: Experimental setups, equipment and methodology of a study of hydrodynamics of swimming of aquatic animals. Translation from Russian into English. 15p. 16refs. from Delft Technical University BTUD, National Technical Information Service Operation Division, British Library Document Supply Centre as JPRS-63848 p 49 - 63.
10. Семенов, Н. П.; Бабенко, В. В.; Каян, В. П.: Экспериментальные исследования некоторых особенностей гидродинамики плавания дельфинов. Бионика, 1974, вып. 8, с. 23 - 31.  
Semenov, N. P.; Babenko, V. V.; Kajan, V. P.: Éksperimental'nye issledovanija nekotorych osobennostej gidrodinamiki plavanija del'finov. Bionika, Kiev: Izd. Naukova Dumka, 1974, vyp. 8, s. 23 - 31.  
Englisch: Experimental research on some features of dolphin swimming hydrodynamics. Translation from Russian into English. 11p. 27refs. from Delft Technical University BTUD, National Technical Information Service Operation Division, British Library Document Supply Centre as JPRS-63492 p 16 - 26.
11. Gray, J.: The propulsive powers of the dolphin. J. Exp. Biol., 1936, 13, p. 192 - 199.  
Gray, J.: The propulsive powers of the dolphin. The Journal of Experimental Biology/ the Company of Biologists. Cambridge: Company of Biologists, 1936, 13, p. 192 - 199.
12. Hirano, S.: The swimming form of a dolphin. J. Kansai soc. Nacal Archit., Japan, 1972, N 145, p. 37 - 45.  
Hirano, S.: The swimming form of a dolphin. Journal of the Kansai Society of Naval Architects. Japan, 1972, N 145, p. 37 - 45. /japan.; engl. Summary/
13. Lang, T. G., Norris, K. S.: Swimming speed of a pacific bottlenose porpoise. Science, 1966, 151, N 3710, p. 588. /engl./



14. Niiler, P. P.; White, H. J.: Note on the swimming deceleration of a dolphin. Journal of Fluid Mechanics, Cambridge: Cambridge University Press, 1969, 38, N3, p. 613 - 617. /engl./

Stuttgart, 29.06.2005-06-29

Übersetzt von:

(Sören Ludwig)

U/573

шению объемного расхода суспензии через сечение канала, увеличение температуры приводит к уменьшению значения  $\mu_{эф}$  и возрастанию объемного расхода. При неизотермическом течении распределение скорости и эффективной вязкости по сечению канала несимметрично.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Бегоулев П. Б., Шмаков Ю. И. Реологические уравнения состояния слабых растворов полимеров с жесткими эллипсоидальными макромолекулами при наличии электрического поля.— ИФЖ, 1972, 23, № 1, с. 88—93.
2. Бегоулев П. Б., Шмаков Ю. И. Особенности течения разбавленных суспензий жестких эллипсоидальных частиц при наличии внешнего силового поля.— ИФЖ, 1973, 24, № 6, с. 1094—1098.
3. Ланс Д. Численные методы для быстродействующих вычислительных машин. М., ИЛ, 1962. 328 с.
4. Лыков А. В., Берковский Б. М. Законы переноса в неньютоновских жидкостях.— В кн.: Тепло- и массообмен в неньютоновских жидкостях. М., 1968, с. 5—14.
5. Цветков В. Н., Эскин В. Е., Френкель С. Я. Структура макромолекул в растворах. М., «Наука», 1964. 720 с.
6. Шмаков Ю. И., Таран Е. Ю., Бегоулев П. Б. Течение разбавленных растворов полимеров в плоском канале.— Гидромеханика, 1972, вып. 20, с. 87—92.
7. Einstein A. Berichtigung zu meiner Arbeit: «Eine neue Bestimmung der Moleküldimensionen».— Ann. Phys., 1911, N 34, p. 591—600.

Киевский университет  
им. Т. Г. Шевченко

Поступила в редколлегию  
4.XII 1973 г.

УДК 599.537

В. П. КАЯН, В. Е. ПЯТЕЦКИЙ

### КИНЕМАТИКА ПЛАВАНИЯ ДЕЛЬФИНА АФАЛИНЫ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ РЕЖИМА УСКОРЕНИЯ

Уже длительное время дельфины вызывают большой интерес с точки зрения изучения и использования их выдающихся природных особенностей. Эти высокоспециализированные морские животные хорошо приспособлены к непрерывному плаванию с различными скоростями. Из всех морских млекопитающих они относительно наиболее быстроходные пловцы.

Исследователи, изучавшие в различное время плавание дельфинов, по-разному объясняли механизм их движения, притом зачастую противоречиво. Краткая историческая справка с указанием литературных источников и описанием простейших экспериментов по определению степени участия хвостового плавника в создании силы тяги имеется в работе [3].

В связи с известным парадоксом Грея [11], согласно которому сопротивление движущегося дельфина в несколько раз меньше сопротивления аналогичной ему по форме и размерам жесткой модели, представляет интерес изучение приспособлений, имеющих у дельфина для предполагаемого снижения гидродинамического сопротивления. Поскольку тяга дельфина, равная при равномерном движении его гидродинамическому сопротивлению с обратным знаком, образуется за счет колебательных движений стебля и лопасти хвостового плавника с нарастанием амплитуды до максимума на задней кромке лопасти хвостового плавника [10], то для определения величины гидродинамического сопротивления этого животного необходимо с высокой степенью точности знать кинематические параметры его движения. Следует отметить, что в литературе этот вопрос освещен недостаточно, а немногие имеющиеся сведения [1, 4, 5, 12—14] явно не позволяют выполнять необходимые вычисления. Ранее нами опубликованы данные [7, 8] о кинематике пла-

вания дельфинов при небольших скоростях плавания без сопоставления их с величиной и знаком ускорения дельфина.

Ниже приведены результаты экспериментальных исследований плавания шести афалин длиной  $L=2,35 \div 2,65$  м. Подопытные животные были приучены по команде проходить рабочий участок в канале. В средней части канала одна боковая стенка полностью застеклена на участке в несколько длин животного. С вышки, расположенной над каналом, при прохождении животным рабочего участка контролировалось в каждом режиме расстояние дельфина от боковой стенки. Проходы животного вплотную вблизи какой-либо боковой стенки не засчитывались.

Регистрация элементов кинематики плавания исследуемого животного проводилась киноаппаратом «Конвас-автомат» со скоростью съемки 30—40 кадров в секунду. Для работы использовалась черно-белая негативная киноплёнка типа КН-1, КН-3 и Микрат-200 шириной 35 мм с размером кадра  $16 \times 22$  мм. Применялись кинообъективы типа РО-61 и РО-56 с фокусным расстоянием  $F=28$  и  $F=35$  мм соответственно. Для повышения точности определения промежутка времени между последующими на киноплёнке кадрами снаружи у остекленной стенки устанавливался электросекундомер [9], стрелка которого совершала два полных оборота за 1 с, при этом точность отсчета времени составляла 0,005 с. Расстояние от киноаппарата до остекленной стенки равнялось 7,3 м.

Для последующей работы отбирались режимы, на которых наблюдались регулярные колебания хвостовой части тела дельфина, а траектория движения его центра тяжести была почти прямолинейна и близка к горизонтальной. Статистическая обработка киноплёнок производилась с помощью дешифратора «Микрофот» типа 5ПО-1 с кратностью увеличения 16. Масштаб пути, проходимого дельфином в продольном направлении, постоянно изменялся, увеличиваясь от центра кадра до края на 5—10%, что учитывалось в каждом конкретном случае. Результаты исследований представлены в графическом виде.

Вследствие нестационарности поступательного движения дельфина все параметры, характеризующие кинематику плавания животного, определялись как осредненные за один период колебаний хвостового плавника. Для каждого периода, как и ранее [8], строились зависимости амплитуды колебаний  $A_0$  развилки хвостового плавника от времени  $t$ , откуда находились средние для каждого периода колебаний  $T$  значения  $A_0$  и частоты  $f$ . По перемещению центра тяжести дельфина на кадрах киноплёнки за промежуток времени  $\Delta t$  вычислялась его скорость  $v$  и строились графики  $v=f(t)$ . По этим графикам находились осредненные за каждый период колебаний хвостового плавника значения  $v_{\text{ср}}$  и изменения скорости  $v$ . Все полученные с графиков значения  $f$  и  $A_0$  были разбиты на группы в зависимости от величины и знака изменения скорости в течение рассматриваемого периода колебаний (обозначения приведены на рис. 1).

Между частотой колебаний хвостового плавника  $f$  и относительной скоростью в длинах тела  $v/L$  у дельфина, как у многих рыб и других

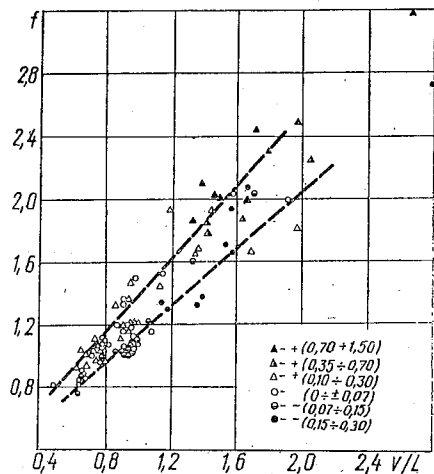


Рис. 1. Зависимость частоты  $f$  колебаний хвостового плавника от относительной скорости  $v/L$ . Величины ускорений,  $\text{м/с}^2$ :

1—+(0,70—1,50); 2—+(0,35—0,70); 3—+(0,10—0,30); 4—(0±0,07); 5—(0,07—0,15); 6—(0,15—0,80).

китообразных [5, 7, 8] наблюдается прямолинейная зависимость (рис. 1). Разброс точек на рис. 1 объясняется тем, что тяга, создаваемая колеблющимся хвостовым плавником животного, зависит в равной мере как от частоты, так и от амплитуды колебаний плавника.

Однако можно заметить, что точки, соответствующие режимам плавания дельфина с замедлением, располагаются ниже, чем точки для режимов плавания с ускорением. Через первые из них можно провести  $f = 0,95 \frac{v}{L} + 0,2$ , а через вторые — прямую, описываемую уравнением

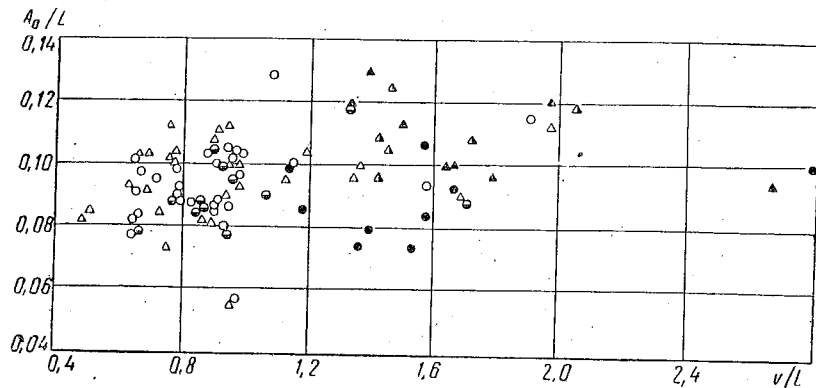


Рис. 2. Зависимость относительной амплитуды  $A_0/L$  колебаний хвостового плавника от относительной скорости  $v/L$ . Обозначения те же, что и на рис. 1.

$f = 1,2 \frac{v}{L} + 0,1$ . Осредненно через все точки рис. 1. можно провести прямую вида  $f = 1,1 \frac{v}{L} + 0,15$ , которая приблизительно характеризует

равномерное движение дельфина. Некоторое отличие полученных зависимостей  $f(v/L)$  от приведенных в работе [8] объясняется тем, что они получены на основании обработки значительно большего количества экспериментальных данных при значительно больших скоростях плавания (до 6,5 м/с).

Ряд зависимостей  $\frac{A_0}{L} \left( \frac{v}{L} \right)$  для различных ускорений приведен на рис. 2, откуда следует, что относительная амплитуда при плавании с ускорением порядка 0,2 — 0,3 м/с<sup>2</sup> примерно на 20 — 30% выше, чем при плавании с замедлением порядка 0,05 — 0,15 м/с<sup>2</sup>. Кривые зависимостей  $\frac{A_0}{L} \left( \frac{v}{L} \right)$  для близких по величине ускорений имеют явно выраженный экстремум при значениях  $\frac{v}{L} = 0,80 \div 0,90$ . Если осредненное за период колебаний плавника ускорение поступательного движения дельфина близко к нулю, то относительная амплитуда имеет величину порядка 0,09 — 0,10. При  $\frac{v}{L} > 1$  с увеличением  $v$  и  $f$  амплитуда несколько уменьшается. Зависимость числа  $Sh = Af/v$ , где  $A = 2A_0$  — полный размах колебаний хвостового плавника, от числа  $Re = vL/\nu$  представлена на рис. 3 ( $\nu$  — кинематическая вязкость и в наших опытах изменялась от  $0,92 \cdot 10^6$  до  $1,16 \cdot 10^6$  м/с<sup>2</sup>). Характер расположения экспериментальных точек зависимости  $Sh = f(Re)$  качественно напоминает график зависимости относительной амплитуды от относительной скорости  $v/L$ , т. е. большим значениям ускорения соответствуют большие числа  $Sh$  и большим значениям замедления — меньшие числа  $Sh$ . Кривые  $Sh = f(Re)$  для равномерного движения также имеют выраженный экстремум при значении  $Re \approx (4 \div 6) \cdot 10^6$ . Некоторое

уменьшение числа  $Sh$  с увеличением значения  $v$  объясняется тем, что в этом случае амплитуда колебаний хвостового плавника  $A_0$  также уменьшается, приближаясь к какому-то оптимальному значению, а величина отношения  $f/v$  для дельфина определенной длины примерно постоянна. Падение тяги машущего движителя, связанное с уменьшением его амплитуды колебаний  $A_0$ , компенсируется увеличением осредненной скорости поперечного движения  $u_{\text{поп}}$  хвостового плавника [10], которая прямо пропорциональна его частоте  $f$ .

Кинематика волнового движителя кроме частоты  $f$  и амплитуды  $A_0$  колебаний хвостового плавника характеризуется также длиной локомо-

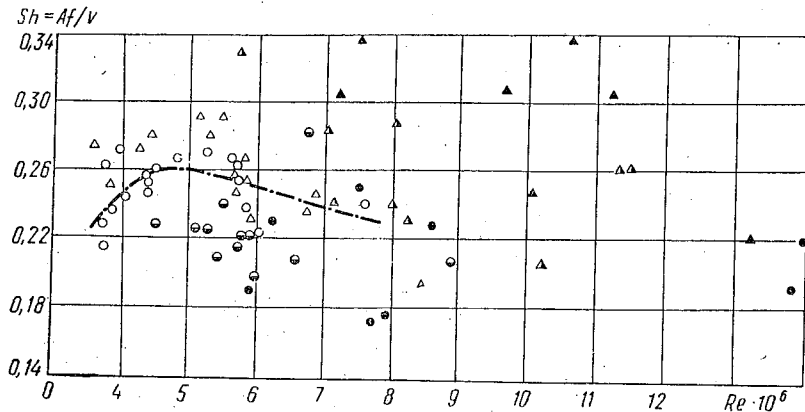


Рис. 3. Зависимость числа  $Sh$  от числа  $Re$ .  
Обозначения те же, что и на рис. 1.

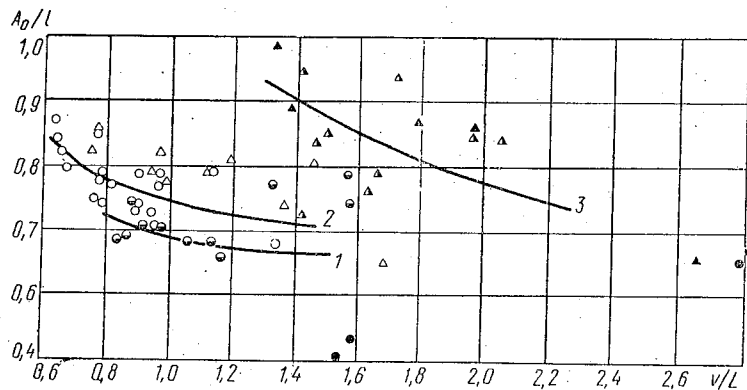


Рис. 4. Зависимость приведенной амплитуды  $A_0/l$  колебаний тела дельфина от относительной скорости  $v/L$ .  
Обозначения те же, что и на рис. 1.

торной волны  $\chi$  и скоростью  $s$  ее распространения вдоль тела животного. Представляется интересным рассмотреть следующие кинематические параметры волнового движения: приведенную амплитуду  $A_0/l$ , где  $l = \chi/2\pi$ ;  $v/s$  — отношение скорости поступательного движения дельфина к скорости движения волны по его телу. Величины длины бегущей по телу дельфина локомоторной волны  $\chi$  и скорости  $s$  распространения этой волны вдоль тела дельфина определялись по кинограммам, построенным для каждого исследованного режима [6].

На рис. 4 показана зависимость приведенной амплитуды  $A_0/l$  от относительной скорости  $v/L$  дельфина. По группам точек, характеризующих большие отрицательные и положительные ускорения, можно провести аппроксимирующие кривые 1 и 3. Точки для режимов с нулевым и небольшим положительным ускорением имеют небольшой разброс и хо-

рошо укладываются на осредняющую эту зависимость кривую 2. С увеличением относительной скорости  $v/L$  значение величины приведенной амплитуды уменьшается и стремится к определенной оптимальной величине, которая для исследованного диапазона скоростей находится в пределах от 0,65 до 0,70.

Зависимость отношения скоростей  $v/c$  от относительной скорости  $v/L$  плавания дельфина показана на рис. 5. Величина отношения  $v/c$  существенно влияет на тягу и к. п. д. машущего движителя с ярко выраженным полулунным хвостовым плавником [2]. Из графика видно, что точки, соответствующие режимам с существенными положительными

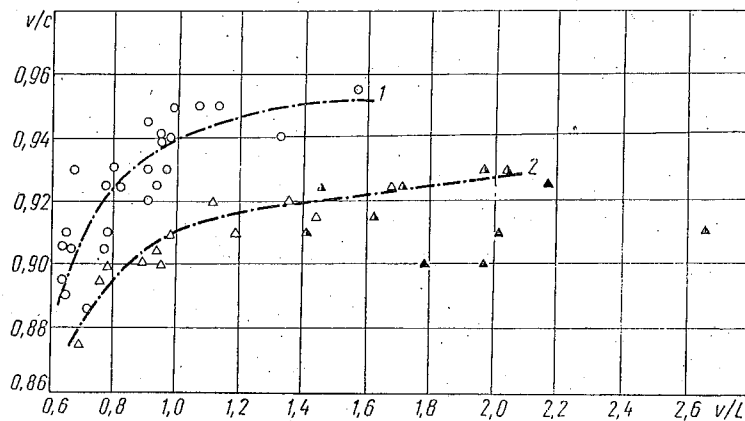


Рис. 5. Зависимость отношения скоростей плавания и скорости бегущей по телу волны  $v/c$  дельфина от относительной скорости  $v/L$ . Обозначения те же, что и на рис. 1.

ускорениями (кривая 2), располагаются значительно ниже осредненной кривой, соответствующей режимам равномерного плавания дельфина (кривая 1).

Приведенные в статье кинематические параметры плавания дельфина с изгибно-колебательными движениями тела в вертикальной плоскости позволяют корректно определить величину тяги [2], развиваемой его машущим движителем при движении с различными режимами ускорения. В дальнейшем особенно интересно будет получить данные, характеризующие режимы активного плавания дельфина при значениях  $Re > 1,5 \cdot 10^7$ .

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Бабенко В. В., Козлов Л. Ф., Першин С. В. О переменном демпфировании кожи дельфина на различных скоростях плавания.— Бионика, 1972, вып. 6, с. 42—52.
2. Логвинович Г. В. Гидродинамика плавания рыб.— Бионика, 1973, вып. 7, с. 3—8.
3. Нархов А. С. О движениях *Delphinus delphis* и *Tursiops tursio* во время плавания.— Зоологич. журн., 1939, 18, № 2, с. 326—330.
4. Першин С. В. О резонансном режиме плавания дельфина.— Бионика, 1970, вып. 4, с. 31—36.
5. Першин С. В. Гидробионические зависимости нестационарного гармонического движения рыб и дельфинов как погруженных тел переменной формы.— Проблемы бионики, М., 1973, с. 464—474.
6. Пятецкий В. Е. Гидродинамические характеристики плавания некоторых быстрходных рыб.— Бионика, 1970, вып. 4, с. 20—27.
7. Пятецкий В. Е., Каян В. П. Некоторые кинематические характеристики плавания дельфина азовки.— Бионика, 1972, вып. 6, с. 18—22.
8. Пятецкий В. Е., Каян В. П. О кинематике плавания дельфина афалины.— Бионика, 1975, вып. 9, с. 41—46.
9. Пятецкий В. Е., Каян В. П., Кравченко А. М. Экспериментальные установки, аппаратура и методика изучения гидродинамики плавания водных животных.— Бионика, 1973, вып. 7, с. 91—102. 75080604-032
10. Семенов Н. П., Бабенко В. В., Каян В. П. Экспериментальные исследования неко-

торых особенностей гидродинамики плавания дельфинов.— Бионика, 1974, вып. 8, с. 23—31. 750706 04-009

11. Gray J The propulsive powers of the dolphin.— J. Exp. Biol., 1936, 13, p. 192—199.
12. Hirano S. The swimming form of a dolphin.— J. Kansai soc. Naval Archit., Japan, 1972, N 145, p. 37—45.
13. Lang T. G., Norris K. S. Swimming speed of a pacific bottlenose porpoise. Science, 1966, 151, N 3710, p. 588.
14. Niiler P. P., White H. J. Note on the swimming deceleration of a dolphin.— J. Fluid Mech., 1969, 38, N 3, p. 613—617.

Институт гидродинамики  
АН УССР

Поступила в редколлегию  
1.IX 1975 г.

УДК 599.145 : 591.17

Ю. Е. МОРДВИНОВ

## К ХАРАКТЕРИСТИКЕ ГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ФОРМЫ ТЕЛА И ДВИЖИТЕЛЕЙ НЕКОТОРЫХ ВОДОПЛАВАЮЩИХ ПТИЦ

Изучение приспособлений птиц, рыб, рептилий и млекопитающих к обитанию в водной среде представляет определенный интерес для выяснения путей и закономерностей их развития. Обитание птиц в течение длительного или короткого времени в воде, плотность которой в сотни раз больше плотности воздуха, наложило отпечаток на их строение, движители и способы локомоции в той и другой среде. К настоящему времени наметились два основных направления изучения плавания и ныряния птиц: движители и способы движения по воде и под водой и общие адаптивные особенности (форма тела, удельный вес, структура покрова, глубина ныряния и продолжительность пребывания под водой и др.). Эти направления находятся в теснейшей зависимости.

Поэтому важное значение имеют исследования гидродинамических особенностей строения тела и движителей птиц, в разной степени приспособленных к жизни в воде и относящихся к различным систематическим и экологическим группам.

Цель настоящей работы заключается в том, чтобы на основании собранных морфологических материалов по некоторым водоплавающим птицам (бакланам, толстоклювым кайрам, ипаткам, шилохвости и глупышам) найти цифровые показатели, характеризующие гидродинамические качества формы тела, и показатели, в определенной мере характеризующие эффективность их движителей в создании пропульсивной силы при плавании в воде.

Материалы для настоящей статьи собраны автором в экспедиции на Командорских островах летом 1974 г.

Одним из важнейших гидродинамических показателей, характеризующих форму тела животных, является показатель ее удлиненности. Многие авторы обращали внимание на тот факт, что тело птиц, обитающих в водной среде, более вытянуто и несколько сплющено в дорсо-вентральном направлении по сравнению с таковым у птиц, не связанных с водой [4—7, 13, 14 и др.]. Кости туловища, особенно тазового и грудного отделов, сужены и удлинены, что в первую очередь связано со снижением встречного сопротивления при плавании в толще воды. Однако количественная оценка степени удлиненности тела отдельных видов не приводится.

Для характеристики формы тела рассматриваемых птиц, с точки зрения ее гидродинамических особенностей, использованы показатель формы корпуса и величина относительного удлинения тела. Из гидродинамики известно [9, 11 и др.], что сопротивление движению полностью погруженных тел в значительной степени зависит от их относительного