

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

Hydrodynamische Charakteristika des Großen Tümmlers bei unterschiedlichen Beschleunigungszuständen

Deutsche Vollübersetzung aus:

Bionika. Kiev: Izd. Naukova Dumka, 1978, Bd. 12, S. 48 - 55.

Russisch:

Гидродинамические характеристики дельфина афалины при различных режимах ускорения

Gidrodinamičeskie charakteristiki del'fina afaliny pri različnych režimach uskorenija

Unter den Meerestieren sind Delfine am besten für die Simulation des Schwimmantriebs geeignet, da bei ihnen die lokomotorischen Schwingungsbewegungen hauptsächlich auf den Schwanzbereich des Körpers konzentriert sind. Obwohl Delfine über relativ geringe Kraftressourcen verfügen, können sie recht hohe Schwimgeschwindigkeiten erreichen. Das bekannte Gray-Paradoxon [17] erklärt dies mit dem relativ geringen hydrodynamischen Widerstand dieser Tiere beim Schwimmen.

Die Bestimmung des Widerstandes eines Delfins in Bewegung mit Hilfe von Messinstrumenten ist leider noch nicht möglich. Deshalb wurden in letzter Zeit in verschiedenen Ländern Versuche unternommen, ein theoretisches Modell für die Bewegung von Fischen und Delfinen zu erarbeiten [8; 20; 21]. Auf der Grundlage der allgemeinen Lehrsätze der "Theorie der schlanken Körper" und des bekannten Impuls- und Energieerhaltungssatzes entwickelte das Mitglied der Akademie der Wissenschaften der UdSSR, G. V. Loginovič, unter Verwendung der hydrodynamischen Gleichungen für einen Tragflügel mit großer Spannweite eine Formel zur Berechnung des Vortriebsmittelwertes innerhalb einer Schwingungsperiode und des Antriebswirkungsgrades für Wassertiere mit einer großen sichelförmigen Schwanzflosse (Thunfische, Delfine) [8]. Es wird gezeigt, dass im Wesentlichen die kinematischen Bewegungskennzahlen der Schwanzflosse auf die Entstehung des Vortriebs des Tieres Einfluss nehmen.

Auf der Grundlage einer Veröffentlichung experimenteller Daten zur Kinematik der Schwimmbewegung des Großen Tümmlers [10] bei Schwimgeschwindigkeiten von bis zu 2,5 m/s wurden später nach den Formeln von Loginovič deren hydrodynamischen Kennzahlen errechnet [11]. Des Weiteren wurden kinematische Kennzahlen von 6 Großen Tümmlern mit Schwimgeschwindigkeiten im Bereich von 1,5 bis 6,5 m/s [5] und unterschiedlichen Beschleunigungszuständen ermittelt. Die experimentellen Daten wurden durch Zeitlupenaufnahmen in einem biohydrodynamischen Kanal gewonnen, der speziell für die Arbeit mit Delfinen präpariert war [12]. Körperform und geometrische Maße dieser Delfine sind in Abbildung 1 und in Tabelle 1 dargestellt.

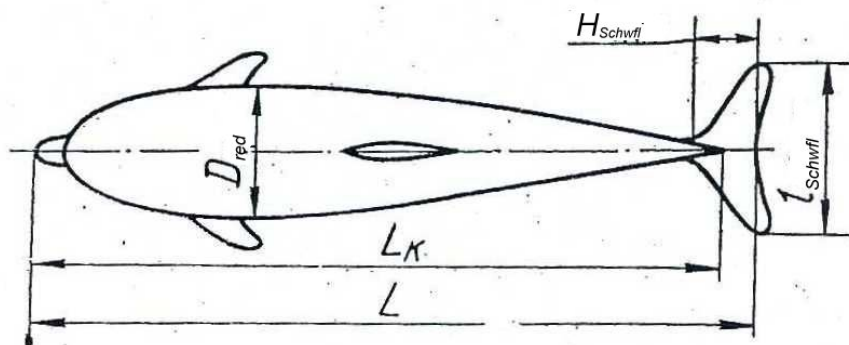


Abb. 1: Körperform eines Großen Tümmlers

Tab. 1: Geometrische Maße der Versuchstiere

Parameter	Versuchstier					
	1	2	3	4	5	6
Vollständige Länge L, m	2,35	2,40	2,40	2,45	2,55	2,65
Korpuslänge L _K , m	2,25	2,30	2,24	2,35	2,44	2,52
Wurzelprofilsehne der Schwanzflosse, H _{Schwfl.} , m	0,21	0,22	0,29	0,23	0,22	0,225
Spannweite der Schwanzflosse, l _{Schwfl.} , m	0,53	0,52	0,58	0,54	0,59	0,61
Reduzierter Durchmesser des Modells D _{red.} , m	0,41	0,38	0,415	0,43	0,42	0,455
Masse G, kg	≈150	≈140	160	185	175	210
Streckung des Körpers, $\lambda_K = \frac{L_K}{D_{red}}$	5,5	6,05	5,4	5,4	5,8	5,55
Flächeninhalt der benetzten Körperoberfläche ("wetted area"), Ω, m ²	2,18	2,26	2,35	2,60	2,65	3,10
Streckung der Schwanzflosse, $\lambda = l_{Schwfl}^2 / S_{Schwfl}$	4,3	3,7	3,5	4,1	4,3	4,1

Im Folgenden werden die hydrodynamischen Kennzahlen des aktiven Schwimmens dieser Tiere aufgeführt, die nach den erwähnten Formeln von Loginovič [8] berechnet wurden. Der Mittelwert des Gesamtvortriebs eines Delfins innerhalb eines Schwingungszyklus wurde im gegebenen Fall nach folgender Formel bestimmt:

$$\{F_x\} = \frac{\lambda'_1}{1 + \frac{\lambda}{2}} v^2 \left(\frac{A_0}{l} \right)^2 \left[\frac{c}{v} \left(\frac{c}{v} - 1 \right) - \frac{1}{1 + \frac{\lambda}{2}} \left(\frac{c}{v} - 1 \right)^2 \right], \quad (1)$$

v sei die Translationsgeschwindigkeit des Tieres in m/s; c die Ausbreitungsgeschwindigkeit der lokomotorischen Welle entlang des Körpers, m/s; A_0 die Amplitude der lokomotorischen Welle am hinteren Rand der Schwanzflosse, m; $l = \frac{\chi}{2\pi}$ die reduzierte Wellenlänge, m; χ die Wellenlänge der lokomotorischen Welle, m; $\lambda'_1 = \rho \pi a^2$ der von der Schwanzflosse in Bewegung versetzte Wasserkörper, kg·s²/m²; ρ die Wasserdichte, 104 kg·s²/m⁴; $2a$ die Spannweite der Schwanzflosse, m; $\lambda = \frac{(2a)^2}{S_{Fl}}$ die Streckung der Schwanzflosse, m; S_{Fl} der Flächeninhalt der Schwanzflossengrundrissfläche, m².

Im Sonderfall, wenn die Bewegung des Delfins linear und gleichmäßig verläuft und die Beschleunigung der Bewegung seines Massenmittelpunktes innerhalb einer Schwingungsperiode gleich Null ist, sind die absoluten Beträge des Vortriebs F_x und des Widerstands R_x gleich, jedoch entgegengesetzt ausgerichtet.

Der Koeffizient des hydrodynamischen Gesamtwiderstands des Delfins wurde nach der Formel

$$\zeta = \frac{2R_x}{\rho v^2 \Omega} \quad (2)$$

bestimmt, wobei Ω die benetzte Oberfläche ("wetted area") des Delfins ist, die sich aus den geometrischen Körper- und Flossenmaßen errechnen lässt.

Den Mittelwert für den idealen hydromechanischen Wirkungsgrad des Antriebssystems des Delfins innerhalb einer Schwingungsperiode, der dem Verhältnis der Nutzarbeit zur insgesamt aufgewendeten Arbeit entspricht (Nutzarbeit plus kinetische Energie des Strömungsnachlaufs), finden wir mit Hilfe des Ausdrucks:

$$\eta_i = 1 - \frac{1}{1 + \frac{\lambda}{2}} \left(1 - \frac{v}{c}\right). \quad (3).$$

Die für die Berechnung benötigten kinematischen Parameter $\frac{A_0}{l}$ und $\frac{v}{c}$ bei unterschiedlichen Geschwindigkeiten und Beschleunigungen der Delfinbewegung sind der Arbeit [5] entlehnt worden. Die Streckung der Schwanzflosse liegt bei den untersuchten Delfinen zwischen 3,5 und 4,3. Alle Berechnungen wurden in Tabellenform ausgeführt. Die Berechnungsergebnisse für die hydrodynamischen Kennzahlen der Delfine werden in Abhängigkeit von der Schwimmggeschwindigkeit und -beschleunigung graphisch dargestellt.

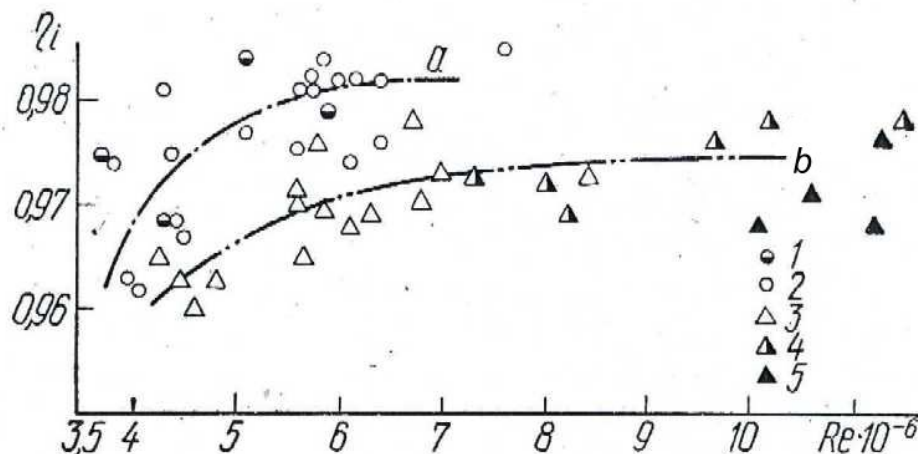


Abb. 2: Abhängigkeit des idealen hydromechanischen Wirkungsgrades des Delfintriebs von der Reynoldszahl bei Beschleunigung der Bewegung, m/s^2 :
 1: (-0,10) – (-0,03); 2: (-0,2) - 0,08; 3: 0,10 - 0,30; 4: 0,35 - 0,70; 5: 0,75 - 1,50;
 a - gleichförmige Bewegung, b - gleichförmig beschleunigte Bewegung

In Abb. 2 wird die Abhängigkeit des nach Formel (3) berechneten idealen hydromechanischen Wirkungsgrades des Delfintriebs von der Reynoldszahl gezeigt. Die hier dargestellten η_i -Werte entsprechen konkreten

Schwimmdurchläufen der Delfine mit unterschiedlichen positiven und negativen Beschleunigungswerten ν , m/s^2 , deren Mittelwert für eine Schwingungsperiode der Schwanzflosse gebildet wurde. Aus den η_i - Werten folgt, dass bei einem aktiven Schwimmdurchlauf mit positiver Beschleunigung (Abb. 2, b), wenn also der vom Antrieb des Delfins entwickelte Vortrieb größer ist als der Umgebungswiderstand, der hydromechanische Wirkungsgrad etwas geringer ist als beim gleichförmigen Schwimmen des Delfins (Abb. 2, a). Mit steigender Bewegungsgeschwindigkeit lassen sich eine abnehmende Streuung der Wirkungsgradwerte und eine allgemeine Tendenz zur Steigerung des Wirkungsgrads beobachten. Die im Vergleich zur Arbeit [11] höheren Wirkungsgradwerte η_i ergaben sich aus einer genaueren Berechnung der tatsächlichen Geschwindigkeit ν der Delfinbewegung (in den Arbeiten [10, 11] wurde die Maßstabsänderung des Weges des Delfins entlang eines Einzelfilmbildes nicht berücksichtigt, was zu einer Verringerung der ν -Werte führte und damit auch zur Verringerung der Werte für das Verhältnis $\frac{\nu}{c}$).

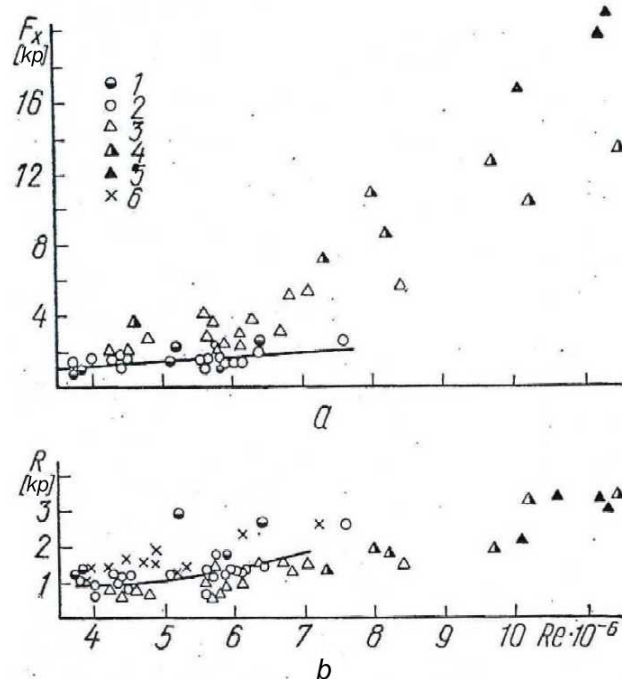


Abb. 3: Abhängigkeit der Vortriebskraft des Antriebs (a) und des hydrodynamischen Widerstandes (b) von der Schwimgeschwindigkeit und -beschleunigung des Delfins, m/s^2 :
 1: (-0,10) – (-0,03); 2: (-0,2) - 0,08; 3: 0,10 - 0,30; 4: 0,35 - 0,70; 5: 0,75 - 1,50;
 6 - Beschleunigung beim Trägheitsschwimmen

Der nach Formel (1) berechnete Mittelwert der Vortriebskraft des Delfintriebs für eine Schwingungsperiode $\{F_x\}$ wird in Abb. 3, a in Abhängigkeit von der Zahl $Re = \frac{\nu L}{\nu}$ dargestellt, wobei ν der kinematische Viskositätskoeffizient des Wassers ist, dessen Werte sich im gegebenen Fall änderten: $(0,93-1,16) \cdot 10 \text{ m}^2/\text{s}$. Die durchgehende Linie durch die Punkteschar "2" in der graphischen Darstellung zeigt Durchläufe, in denen sich die Delfine fast gleichförmig bewegten (d. h. F_x und R_x haben faktisch den gleichen Absolutwert). Mit steigender Geschwindigkeit und Beschleunigung der Schwimmbewegung des Delfins erhöht sich auch die

Vortriebskraft des Antriebs, die zur Überwindung des hydrodynamischen Widerstands und der Trägheitskräfte notwendig ist.

Für das beschleunigte Schwimmen des Delfins wurde der Mittelwert des hydrodynamischen Widerstandes innerhalb einer Schwingungsperiode $\{R_x\}$ aus der Differenz zwischen der Vortriebskraft $\{F_x\}$ und dem Trägheitswiderstand $\{R_i\}$ gebildet, d. h.

$$\{R_x\} = \{F_x\} - \{R_i\}. \quad (4)$$

Nach dem 2. Newtonschen Gesetz muss für die Bewegung eines Körpers mit der Masse m und der Beschleunigung v die Kraft mv aufgewendet werden. Bei der Bewegung eines Körpers in einer viskosen Flüssigkeit muss außerdem die virtuelle Masse berücksichtigt werden. Da die Hauptmasse des Delfins sich nahezu schwingungsfrei und geradlinig bewegt und nur Schwanzstiel und Schwanzflosse Schwingungen ausführen, sieht der Ausdruck für die Gesamtmasse, wenn man den Delfinkorpus in der ersten Näherung als gleichgroßen Rotationsellipsoiden annimmt, folgendermaßen aus:

$$m = m_o + \lambda_{11}, \quad (5)$$

$m_o = \frac{G}{g}$ sei die Delfinmasse, $\text{kg} \cdot \text{s}^2/\text{m}$; G das Gewicht des Delfins, kg ; $\lambda_{11} = k_{11} \rho V$ die virtuelle Masse, $\text{kg} \cdot \text{s}^2/\text{m}$; V die Wasserverdrängung des Delfins, m^3 , und k_{11} der Koeffizient der virtuellen Masse. Das Gewicht des Delfins wurde durch Wägung an der Luft bestimmt, der Koeffizient k_{11} anhand der Nomogramme aus der Literatur [1]. Für die Versuchsdelfine betragen die Werte $k_{11} \approx 0,04 - 0,05$. Zum Schluss wurden die R_i -Werte nach der Formel

$$R_i = m_o(1 + k_{11})\{v\} \quad (6)$$

berechnet. Nach der in der Arbeit [5] genannten Methode wurden die Verschiebungen des Massenmittelpunktes des Delfins innerhalb kurzer Zeitabschnitte (etwa 0,05 s) berechnet und graphische Darstellungen der Änderung der Translationsgeschwindigkeit des Delfins v für den Mittelungszeitraum (1 - 5 s) konstruiert. Anhand dieser Darstellungen wurde für jede vollständige Schwingungsperiode der Schwanzflosse die mittlere Geschwindigkeitsänderung des Delfins $\{v\}$ bestimmt. Die nach Formel (4) berechneten hydrodynamischen Widerstandswerte für aktive Schwimmdurchgänge der Delfine in Abhängigkeit von der Reynoldszahl bei unterschiedlichen Beschleunigungswerten v werden in Abb. 3, b dargestellt. Auch hier wird in der Mitte eine geschlossene Linie durch die Punkteschar "2" gezogen, die zu den Durchgängen mit nahezu gleichförmiger Delfinbewegung gehört. Hier werden außerdem die Widerstandswerte für einen Delfin gezeigt, der sich ohne Biegungs-Schwingungs-Bewegungen des Korpus nur durch Trägheit fortbewegt (Punkteschar "6"). Für diesen Fall wurden die hydrodynamischen Widerstandswerte nach der Formel (6) bestimmt. Die Verringerung der Geschwindigkeit v wurde als Mittelwert für die gesamte Mittelungsperiode errechnet. Nahezu im gesamten untersuchten Schwimgeschwindigkeitsbereich war der Widerstand des Delfins, der sich durch Trägheit fortbewegte, höher als bei einem Delfin mit aktiven Biegungs-Schwingungs-Bewegungen des Körpers. Die ermittelten Daten sind eine indirekte Bestätigung der Hypothese von Gray [17] und Wu [21], dass die Wellenbewegung die laminare Umströmung des Körpers verzögert, indem sie im Schwanzbereich einen negativen

Druckgradienten erzeugt. Diese Hypothese wird auch durch die experimentelle Arbeit von Romanenko [13] unterstützt, der die Druckverteilung auf einem schwingenden umströmten Körper (Gummikeil) untersucht hat.

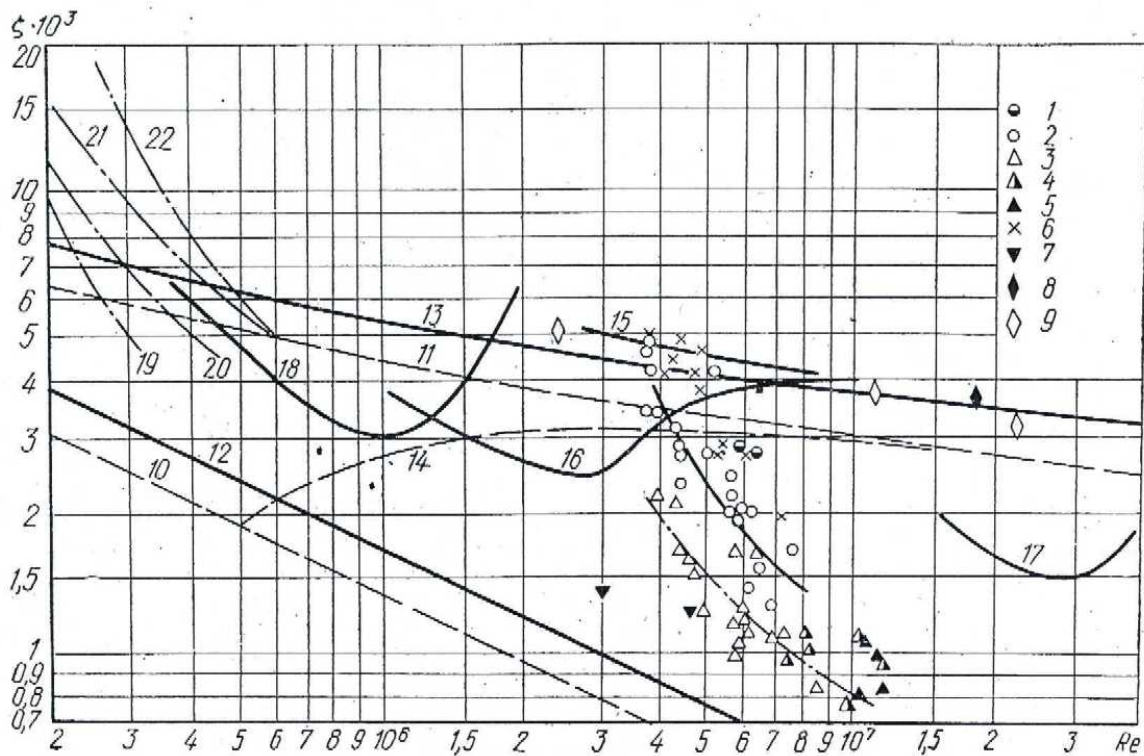


Abb. 4: Abhängigkeit des hydrodynamischen Widerstandskoeffizienten von verschiedenen Wassertieren und deren Modellen von der Reynoldszahl: 1 - 6 wie in den Abb. 2 und 3; 7, 8, 9 entsprechend den Angaben in den Arbeiten [15], [9] und [16]

Die hydrodynamischen Widerstandskoeffizienten des Delfins ζ in Abhängigkeit von der Reynoldszahl wurden nach der Formel (2) errechnet und sind in Abb. 4 dargestellt. Nahezu alle ermittelten ζ -Werte sind in der Übergangszone angeordnet: nach unten begrenzt durch die Kurve 12, die den Werten des Widerstandskoeffizienten eines dem Delfinkörper in Form und Abmaßen gleichenden technisch glatten Rotationskörpers bei vollständiger laminarer Umströmung entspricht; nach oben begrenzt durch die Kurve 13, die den Werten des Widerstandskoeffizienten desselben Körpers mit vollständiger turbulenter Umströmung entspricht.

Bekanntlich ist der Widerstandskoeffizient eines gut umströmten, vollständig eingetauchten Körpers proportional zum Reibungskoeffizienten einer äquivalenten Platte [3]. Der Proportionalitätskoeffizient ergibt sich aus der experimentellen Kurvenschar in Abhängigkeit vom Verhältnis der wichtigsten Korpusabmessungen $\frac{L}{B}$ und $\frac{H}{B}$, wobei L - die Länge, B - die Breite und H die Höhe des Korpus ist [3].

In unserem Falle betrug der Proportionalitätskoeffizient für alle Versuchstiere $k=1,22$. Somit stellen die Kurven 12 und 13 die 1,22-fach vergrößerten Werte des Widerstandskoeffizienten einer technisch glatten Platte bei laminarer (Kurve 10) und turbulenter (Kurve 11) Umströmung [16] dar.

Die geringfügige Streuung der errechneten Punkte lässt sich gänzlich durch die Streuung der experimentellen Amplituden-Frequenz-Kennzahlen der Versuchsdelfine erklären. Die ermittelten ζ -Werte sind, wie auch die η_i -Werte, aus den oben erläuterten Gründen etwas geringer, als die in der Arbeit [11] ermittelten Werte. Alle ζ -Werte für die Großen Tümmler liegen in der Zone der gemischten Umströmung ihrer Körper.

Zum Vergleich werden in Abb. 4 auch die am Computer errechneten Widerstandskoeffizienten für das Modell eines Großen Tümmlers bei vollständiger turbulenter Umströmung (Kurve 15) und bei gemischter Umströmung mit einem laminaren Bereich bis $\overline{x_{ku}} = 0,687$ (Kurve 16) [15] dargestellt. Die von Semenov experimentell ermittelte Punktschar "7" für einen Großen Tümmler mit der Länge $L=2,05\text{ m}$, der sich durch Trägheit innerhalb eines Netzgeheges bewegt, weisen eine große Streuung auf ($1 - 2 \cdot 10^{-3}$ und $0 - 2 \cdot 10^{-3}$) und sind wahrscheinlich zu niedrig, was nach eigenen Angaben des Autors [15] mit der geringen Genauigkeit der ermittelten Ergebnisse und dem kurzen Mittelungszeitraum (1s und weniger) in Zusammenhang steht. Hier ist außerdem die Arbeit von Kurbatov [7] zu erwähnen, in der der hydrodynamische Widerstandskoeffizient einiger Tiere, die sich durch Trägheit in einem biohydrodynamischen Kanal bewegen, berechnet wurde. Im Zahlenbereich $Re=0,5-1,5 \cdot 10^6$ wurde für den Schweinswal ein Widerstandskoeffizient von $\zeta \simeq (15-25) \cdot 10^{-3}$ ermittelt, ein deutlich überhöhter Wert (wahrscheinlich durch den starken Einfluss der Kanalwände zu erklären, da die Querschnittsfläche des Kanals nur $0,85\text{ m}^2$ betrug).

Die Widerstandskoeffizienten der Punktschar "9" wurden für die benetzte Oberfläche eines Delfins ($L=1,86\text{m}$ und $G=52,7\text{kg}$), der sich durch Trägheit und ohne Biegungs-Schwingungs-Bewegungen des Körpers fortbewegt, errechnet [19]. Sie entsprechen dem Widerstand eines festen Körpers mit äquivalenter Form bei nahezu vollständiger turbulenter Umströmung. Es muss darauf hingewiesen werden, dass die Aufnahmen im gegebenen Fall in einer Meereslagune mit einer Kamera ohne Unterwassergehäuse von der Oberfläche aus gemacht wurden und nicht genau bekannt ist, ob sich beim Abbremsen die Schwanzflosse des Delfins bewegt hat oder nicht.

Außerdem wurden Versuche unternommen, den Widerstand eines Delfins in Bewegung mit Hilfe eines Zusatzwiderstandes (Verwirbelungsring) zu bestimmen [2; 18]. Die Annahme, dass ein trainierter Delfin mit oder ohne Ring jeweils den identischen Vortrieb entwickelt, hält jedoch der Kritik nicht stand, da die Vortriebskraft des Antriebs in zweierlei Betriebsarten, ohne Berücksichtigung der kinematischen Kennzahlen in beiden Fällen, nicht vergleichbar ist.

Die Kurve 17 in Abb. 4 stellt die Abhängigkeit des nach der Formel (2) errechneten Widerstandskoeffizienten der "Dolphin"-Modelle [9] mit einer Linienführung des Korpus in Form eines Rotationskörpers mit dem Profil NACA 66 von der Reynoldszahl dar. Der experimentelle Punkt 8 entspricht dem Wert des Widerstandskoeffizienten desselben Modells für den Fall, dass die Strömung an der Spitze des Modells künstlich verwirbelt wird.

Beim Schleppversuch eines toten Schweinswalkörpers mit der Länge $L=1\text{m}$ durch ein Bassin wurde dessen hydrodynamischer Widerstand bestimmt (Kurve 18) [6]. Es ist jedoch anzumerken, dass sich beim Schleppversuch eine Stange an der Nase des Delfins befand, die die Strömung geringfügig verwirbelte. Der schnelle Anstieg des Widerstandskoeffizienten bei $Re > 10^6$ lässt sich wahrscheinlich durch

den unzureichenden Tiefgang des geschleppten Körpers und damit dem Einfluss der freien Oberfläche auf die Messergebnisse erklären.

Die Kurven 19-22 in Abb. 4 $\zeta(\text{Re})$ zeigen die rechnerisch ermittelten Werte für die hydrodynamischen Widerstandskoeffizienten verschiedener Fische (Forelle, Meeräsche, Blaufisch, Hornhecht) [4]. Die hydrodynamischen Kennzahlen der Vertreter der aalartigen Schwimmweise - der Hornhechte - wurden nach den 1970 von Loginovič vorgeschlagenen Formeln bestimmt [8].

Für die Schwimmweise der Scombridae-Vertreter (Forelle, Meeräsche, Blaufisch) wurde die Antriebskraft, die am Fisch durch den vom hintern Schwanzflossenrand ausgehenden Impulsstrom entsteht [14], nach folgender Formel bestimmt:

$$\{I\} = \frac{\lambda_1'}{2} \left(\frac{A_0}{l} \right)^2 v^2 \left\{ \left(\frac{c}{v-1} \right) \left[1 - \frac{1}{3} \left(\frac{c}{v} + 1 \right) \right] - \left(\frac{l}{L} \right)^2 \right\}. \quad (7)$$

Die Formel (7) für den Lokomotionstyp der Scombriden mit linearer Amplitudenänderung am Fischkörper unterscheidet sich von der in der Arbeit [8] beschriebenen aalartigen Bewegungstechnik nur durch den Faktor in den geschweiften Klammern. Für $\frac{v}{L} > 4$ und $\frac{c}{v}$ -Werte zwischen 1,05-1,15 ist bei ansonsten gleichen Bedingungen der Vortrieb beim Lokomotionstyp der Scombriden um 10-15% geringer als bei der aalartigen Bewegungstechnik.

Die Erhöhung des hydrodynamischen Widerstandes von Fischen bei geringen Geschwindigkeiten wird durch den Umstand begünstigt, dass Fische bei geringen Schwimmgeschwindigkeiten die Brust- und Bauchflossen nicht anlegen, deren Einfluss auf den Widerstand wurde bei dem angewandten Rechenverfahren jedoch nicht berücksichtigt. Mit steigender Schwimmgeschwindigkeit verlagert sich der Wert des hydrodynamischen Widerstandskoeffizienten der Fische in den Bereich, der durch die Kurven 12 und 13 begrenzt wird, wobei sich mit steigenden linearen Abmessungen der Versuchsobjekte und steigender Bewegungsgeschwindigkeit (d. h. mit steigender Reynoldszahl) eine Tendenz zur Verringerung ihres hydrodynamischen Widerstandskoeffizienten beobachten lässt.

Die bei unseren Untersuchungen ermittelten, im Vergleich zu den aus der Hydromechanik fester Körper bekannten, relativ niedrigen hydrodynamischen Widerstandswerte des Delfins, können durch einige spezifische Besonderheiten bedingt sein. Die umströmte Korpusform (Modell "Dolphin") begünstigt durch die anliegende laminare Strömung eine Verringerung des Gesamtwiderstandes des Delfins. Die instationäre Translationsbewegung des Delfins, bedingt durch die Arbeitsweise des Flossenantriebs, kann unter verschiedenen Bedingungen ebenfalls zu einer gewissen Verringerung des Widerstands der Modelle führen, wenn man diese mit einem Material mit elastischen Eigenschaften überzieht. Die Analyse der in Abb. 4 dargestellten experimentellen Berechnungsdaten zeigt, dass bei geringen Schwimmgeschwindigkeiten, wenn der Delfin Kraftressourcen im Überfluss hat, sein hydrodynamischer Widerstandskoeffizient relativ hoch ist. Mit steigender Schwimmgeschwindigkeit und folglich auch mit steigender Reynoldszahl verringert sich der ζ -Wert wesentlich, und es kommt zur gemischten Umströmung, wobei ein bedeutender Teil der Körperoberfläche offensichtlich laminar umströmt wird.

Auf diese Weise unterstützen die auf der Basis der Experimente errechneten Daten zum Widerstandskoeffizienten des Delfins die Hypothese über den im

Vergleich zu herkömmlichen mechanischen Objekten geringen Widerstand des Delfins. Die gewonnenen Ergebnisse sollten nun an mechanischen Modellen mit ähnlicher Form überprüft werden.

Literatur

1. Войткунский, Я. И.; Першиц, Р. Я.; Титов, И. А.: Справочник по теории корабля. Л., Судпромгиз, 1960. 688 с.
Vojtkunskij, Ja. I.; Peršic, R. Ja.; Titov, I. A.: Spravočnik po teorii korablja. Leningrad: Sudpromgiz, 1960. 688 s.
/Handbuch zur Theorie des Schiffbaus; russ./
2. Грушанская, Ж. Я.; Короткин, А. И.: Некоторые вопросы гидродинамики дельфина.-Тез. IV Всесоюз. коф. по бионике. Т. 6. М., 1973, с. 37-41.
Grušanskaja, Ž. Ja.; Korotkin, A. I.: Nekotorye voprosy gidrodinamiki del'fina. In: Tezisy IV Vsesojuznogo konferenca po bionike. Т. 6., Moskva, 1973, S. 37-41.
/Einige Probleme der Hydrodynamik des Delfins; russ./
3. Дробленков, В. Ф.: К вопросу определения коэффициента сопротивления формы судов. - Судостроение, 1960, № 8, с. 8-10.
Droblenkov, V. F.: K voprosu opredelenija koëfficienta soprotivlenija formy sudov. In: Sudostroenie, Leningrad, 1960, Nr. 8, S. 8-10.
/Zur Frage der Bestimmung des Widerstandskoeffizienten von Schiffsformen; russ./
4. Каян, В. П.; Пятецкий, В. Е.: Исследование гидродинамики плавания рыб.- Тез. докл. IV Всесоюз. съезда по теорет. и прикл. механике. К., 1976, с. 61.
Kajan, V. P.; Pjateckij, V. E.: Issledovanie gidrodinamiki plavanija ryb. In: Tezisy dokladov IV Vsesojuznogo s"esda po teoretičeskoj i prikladnoj mechanike. Kiev, 1976, S. 61.
/Untersuchung der Hydrodynamik des Fischeschwimmens; russ./
5. Каян, В. П.; Пятецкий, В. Е.: Кинематика плавания дельфина афалины в зависимости от режима ускорения.-Бионика, 1977, вып. 11, с. 36 - 41.
Kajan, V. P.; Pjateckij, V. E.: Kinematika plavanija del'fina afaliny v zavisimosti ot režima uskorenija. In: Bionika. Kiev: Izd. Naukova Dumka, 1977, Bd 11, S. 36 - 41.
Deutsch:
Kajan, V. P.; Pjateckij, V. E.: Die Kinematik der Schwimmbewegung des Großen Tümmlers in Abhängigkeit vom Beschleunigungsmodus. Deutsche Vollübersetzung aus dem Russischen. Übersetzung Nr. Ü/573 der Übersetzungsstelle der Universitätsbibliothek Stuttgart
6. Козлов, Л. Ф.; Пятецкий, В. Е.; Савченко, Ю. Н.: Буксировочная мощность и возможные скорости плавания дельфинов. - В кн.: Механизмы передвижения и ориентации животных. К., 1968, с. 39 - 48.

Kozlov, L. F.; Pjateckij, V. E.; Savčenko, Ju. N.: Buksirovočnaja moščnost' i vozmožnye skorosti plavanija delfinov. In: *Mechanizmy peredviženija i orientacii životnych*. Kiev: Izd. Naukova Dumka, 1968, S. 39-48.

/Schleppleistung und mögliche Schwimgeschwindigkeiten von Delfinen. In: *Fortbewegungs- und Orientierungsmechanismen von Tieren*; russ./

7. Курбатов, Б. В.: Гидродинамическое сопротивление живых nekтеров.-Тез. докл. IV Всесоюз. конф. по бионике. Т. 6, М., 1973, с. 72-77.

Kurbatov, B. V.: Gidrodinamičeskoe soprotivlenie živych nekterov. In: *Tezisy dokladov IV Vsesojuznoj konferencii po bionike*. Т. 6, Moskva, 1973, S. 72-77.

/Hydrodynamischer Widerstand lebender Pelagier; russ./

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

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

/Hydrodynamik des Schwimmens von Fischen; russ./

9. Петрова, И. М.: Гидробионика в судостроении. Л., 1970, 272 с. (ЦНИИ техн.-экон. исслед.).

Petrova, I. M.: Gidrobionika v sudostroenii. Leningrad: Central'nyj naučno-issledovatel'skij institut informacii i tehniko-ékonomičeskich issledovanij, 1970, 272 S.).

/Hydrobionik im Schiffbau; russ./

10. 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./

11. Пятецкий, В. Е.; Каян, В. П.: Гидродинамические характеристики плавания дельфина афалины. Бионика, 1976, вып. 10, с.80 - 85.

Pjateckij, V. E.; Kajan, V. P.: Gidrodinamičeskie charakteristiki plavanija del'fina afaliny. In: *Bionika*, Kiev: Izd. Naukova Dumka, 1976, vyp. 10, S. 80 - 85.

12. Пятецкий, В. Е.; Каян, В. П.; Козлов, Л. Ф.; Семенов, Н. П.: Устройство для исследования кинематики плавания дельфинов. Бионика, 1978, вып. 12, с. 55 - 58.

Pjateckij, V. E.; Kajan, V. P.; Kozlov, L. F.; Semenov, N. P.: Ustrojstvo dlja issledovanija kinematiki plavanija del'finov. In: *Bionika*, Kiev: Izd. Naukova Dumka, 1978, vyp. 12, S. 55 - 58.

Englisch: Device for investigating the kinematics of swimming dolphins. Translation from Russian into Englisch. National Technical Information Service Operation Division, Springfield-Virginia as JPRS-77320.

13. Романенко, Е. В.: О гидродинамике рыб и дельфинов. - Мор. приборостроение. Сер. Акустика, 1972, № 1, с. 27-32.

Romanenko, E. V.: O gidrodinamike ryb i del'finov. In: *Morskoe priborostroenie*. Serija: Akustika, 1972, Nr. 1, S. 27-32.

/Über die Hydrodynamik von Fischen und Delfinen; russ./

14. Савченко, Ю. Н.; Савченко, В. Т.: Оценка инерционных сил при расчете тяги плавающего гибкого тела.-Бионика, 1973, вып. 7, с. 25-27.

Savčenko, Ju. N.; Savčenko, V. T.: Ocenka inercionnyh sil pri rasčete tjagi plavajuščego gibkogo tela. In: Bionika, Kiev: Izd. Naukova Dumka, 1973, vyp. 7, S. 25-27.

/Abschätzung der Reibungskräfte bei der Berechnung des Vortriebs eines biegsamen schwimmenden Körpers; russ./

15. Семенов, Б. Н.: О существовании гидродинамического феномена дельфина афалины.- Бионика, 1969, вып. 3, с. 54-61.

Semenov, B. N.: O suščestvovanii gidrodinamičeskogo fenomena del'fina afalina. In: Bionika, Kiev: Izd. Naukova Dumka, 1969, vyp. 3., S. 54-61.

16. Шлихтинг, Г.: Теория пограничного слоя. М., "Наука", 1969. 744 с.

Schlichting, G.: Teorija pograničnogo sloja. Moskva: Nauka, 1969, 744 S.

Deutsch:

Schlichting, H.: Grenzschicht-Theorie. Berlin: Springer Bln, 2005.

17. Gray, J.: Studies in animal locomotion. The propulsive powers of the dolphin. In: The Journal of Experimental Biology/ the Company of Biologists. Cambridge: Company of Biologists, 1936, 13, No 1, p. 192 - 199. /engl./

18. Lang, T. G.: Hydrodynamic analysis of cetacean performance. In: Whales, dolphins and porpoise. Ed. K. S. Norris, Berkley-Los Angeles, 1966, p. 410-432. /engl./

19. Lang, T. G.; Pryor, K.: Hydrodynamic performance of porpoise (*Stenella attenuata*). In: Science, 1966, 152, № 3721, p. 531-533. /engl./

20. Lighthill, M. J.: Hydromechanics of equatic animal populsive. In: Annual Review of Fluid Mechanics. Palo Alto, Calif: Annual Reviews Inc., 1969, 1, p. 413-446. /engl./

21. Wu, T. Y.: Hydromechanics of swimming propulsion. In: Journal of Fluid Mechanics. Cambridge: Cambridge Univ. Press, 1971, 46, No 3, p. 521-568. /engl./

Stuttgart, 19. Juli 2005

Übersetzt von:

Sören Ludwig