

Kajan, V. P.:

Über den Widerstandskoeffizienten des Delfins

Deutsche Vollübersetzung aus:

Bionika. Kiev, (1974) Nr 8, S. 31 - 35.

Russisch: О коэффициенте сопротивления дельфина
O koëfficiente soprotivlenija del'fina

Dieser Aufsatz systematisiert Versuchsdaten [5; 7; 10; 14; 17] zum Widerstandskoeffizienten der Bewegung von Delfinen und Delfinmodellen sowie Ergebnisse, die vom Autor anhand der bekannten kinematischen Kennwerte [9] für einen Tümmeler errechnet wurden. Die wichtigsten Maße des Versuchstieres sind:

$L \times B \times H = 1 \times 0,2 \times 0,22 \text{ m}$; L ist die Länge des Delfins von der Spitze des Nasenrostrums bis zur Gabelung der Fluke, B - die maximale Breite und H die maximale Höhe. Der Widerstandskoeffizient ξ eines Delfins in Bewegung ist $\xi = \frac{2R}{\rho V^2 \Omega}$, wobei

R der Widerstand des Delfins, kp ; V - die Fortschrittsgeschwindigkeit, m/s ; ρ - die Wasserdichte, $\text{kp} \cdot \text{s}^2/\text{m}^4$ und $\Omega = 0,486 \text{ m}^2$ die benetzte Oberfläche des Delfins (wetted area) (mit Berücksichtigung der Flossen) ist.

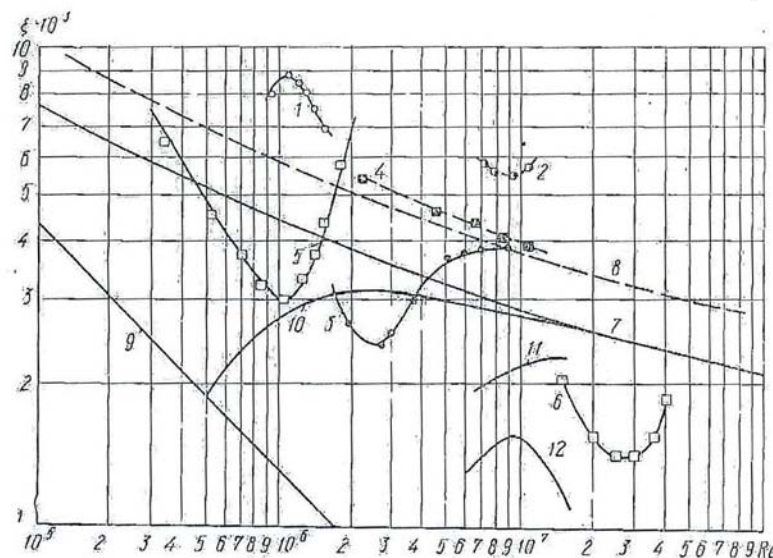
Der vollständige Bewegungswiderstand des Delfins wurde nach der von L. V. Loginovič vorgeschlagenen Näherungstheorie zum Bewegungsmechanismus eines biegsamen Körpers [6] bestimmt. Unter der Bedingung einer konstanten Schwingungsamplitude entlang des schwingenden Körpers gilt $R = \frac{\{M\}}{V}$, wobei

$$\{M\} = \frac{\lambda_1'}{4} V^3 \left(\frac{A}{l}\right)^2 \times \left[\left(\frac{c}{v}\right)^2 - 1 \right]$$

der Mittelwert der Wirkleistung innerhalb einer Schwin-

gungsperiode der Fluke, $\text{kp} \cdot \text{m/s}$ [8]; $\lambda_1' = \rho \pi a^2$ der von der Schwanzflosse in Bewegung versetzte Wasserkörper, $\text{kp} \cdot \text{s}^2/\text{m}^2$; A - die Amplitude der lokomotorischen

Welle, m ; s - die Geschwindigkeit der lokomotorischen Welle, m/s ; $l = \frac{\chi}{2\pi}$ die reduzierte Länge des Delfins, m ; $2a$ - die Spannweite der Delfinfluke, m und χ die Länge der lokomotorischen Welle, m ist.



Grafische Darstellung der Abhängigkeit des Widerstandskoeffizienten der Delfine und Modelle von der Reynoldszahl

Sechs Filmbilder von Schwimmdurchläufen mit linearer Delfinbewegung bei $V=0,87-1,43 \text{ m/s}$ waren für die statistische Auswertung geeignet. Die für die Berech-

nungen notwendigen Längen χ der am Delfinkörper entlang wandernden lokomotorischen Welle und die Ausbreitungsgeschwindigkeiten s dieser Welle wurden anhand der Reihenaufnahmen bestimmt, die für jeden der untersuchten Durchläufe gemacht wurden [8]. Die Abhängigkeit des nach den kinematischen Kennwerten für das Delfinschwimmen [9] berechneten Koeffizienten ξ von der Reynoldszahl wird in der Grafik dargestellt (siehe Kurve 1). Als charakteristische Größe in der Reynoldszahl diente die Länge der Delfine oder der Modelle in Längsrichtung im nicht verformten Zustand. Zum Vergleich werden in der Grafik die Abhängigkeiten der Reibungswiderstandskoeffizienten einer technisch glatten Platte mit vollständiger turbulenter Umströmung (Kurve 7) und vollständiger Laminarumströmung (Kurve 9) in durchgezogenen Kurven dargestellt [12]. Bei Mischformen der Umströmung liegen die Werte für die Widerstandskoeffizienten auf Kurve 10 [12].

Bis zu einem Wert der relativen Schwimmgeschwindigkeit eines Delfins von $\frac{V}{L} = 1 \text{ s}^{-1}$ wird die Beschleunigung im Wesentlichen durch eine Vergrößerung der Schwingungsamplitude erreicht, also auch durch eine Steigerung des Formwiderstands des sich aktiv bewegenden Delfins. Bei $\frac{V}{L} > 1 \text{ s}^{-1}$ erreicht der Delfin eine weitere Steigerung der Schwimmgeschwindigkeit im Wesentlichen schon durch die Erhöhung der Schwingungsfrequenz der Fluke und durch andere spezielle hydrodynamische Delfineigenschaften [11]. Die relative Schwingungsamplitude $\frac{A}{L}$ der Fluke sinkt allmählich vom Maximum auf einen bestimmten optimalen Wert. Deshalb verringert sich der Widerstandskoeffizient eines sich aktiv bewegenden Delfins (Kurve 1) relativ schnell. Laut Literatur [4] ist der Widerstandskoeffizient vollständig belasteter gut umströmter Körper proportional zum Koeffizienten des Reibungswiderstands einer äquivalenten Platte und kann nach der Formel $\xi_{\Phi} = k\xi_R$ berechnet werden, wobei der Proportionalitätskoeffizient k anhand des Verhältnisses der Hauptabmaße $\left(\frac{L}{B}\right)$ und $\left(\frac{H}{B}\right)$ aus der Kurvenschar [4] ermittelt wird. Für die in den Arbeiten [5; 9; 10 und 17] beschriebenen Delfine lag der Proportionalitätskoeffizient zwischen 1,23 und 1,32. Die strichlinienförmige Kurve 8, die durch Multiplikation der ξ_R -Werte aus Kurve 7 mit dem Koeffizienten $k = 1,3$ ermittelt wurde, stellt den Widerstandskoeffizienten eines technisch glatten Festkörpers bei vollständiger turbulenter Umströmung dar.

Es muss erwähnt werden, dass die lokomotorische Bewegung des Delfins geringfügig von der für die Berechnung getroffenen Annahme einer konstanten Schwingungsamplitude entlang des Körpers abweicht. Laut Literatur [11] wird die Biegungs-Schwingungs-Bewegung des Delfinkörpers in einem Inertialsystem unter der Bedingung, dass der Koordinatenursprung an der Spitze des Rostrums liegt, durch folgende Gleichung beschrieben:

$$y = A_0 e^{\beta x} \cos\left\{\alpha\left(t - \frac{x}{c}\right)\right\},$$

wobei y die vertikale Abweichung eines beliebigen Korpuspunktes, x die Strecke längs des Körpers, t die laufende Zeit, A_0 die maximale Amplitude der Transversalschwingungen des vordersten Rostrumteils, $\alpha = \frac{2\pi}{T}$, T - die Schwingungsperiode;

$\beta = \frac{k_0}{V}$ der Faktor, der die Amplitude der Transversalschwingungen längs des Körpers charakterisiert und k_0 der Proportionalitätskoeffizient ist. Deshalb sind die durch die Kurve 1 beschriebenen Werte des Widerstandskoeffizienten eines sich aktiv bewegenden Delfins im Vergleich zu den tatsächlichen etwas überhöht.

Anhand der mittleren Turbulenzwiderstandswerte, die in der Arbeit [17] für einen schwimmenden Delfin beim aktiven Bremsvorgang mit Biegungs-Schwingungs-Bewegung des Korpus dargestellt werden, wurden die Widerstandskoeffizienten (Kurve 2) errechnet. Die Länge des Delfins betrug 2 m, das Gewicht 90 kp, die benetzte Oberfläche (wetted area), die anhand der Hauptabmaße bestimmt wurde, $\Omega = 1,38 \text{ m}^2$. Von den in der Arbeit erwähnten Schwimmdurchläufen wurden für die Berechnung diejenigen ausgewählt, bei denen die negative Beschleunigung am geringsten war. Die errechneten Widerstandswerte $\xi = (5,5 - 5,7) \cdot 10^{-3}$ waren relativ hoch, was sich dadurch erklären lässt, dass sich der Delfin im aktiven Bremsvorgang befand.

Kurve 3 der Abbildung stellt die Widerstandswerte eines Delfins mit der Länge $L=2,22 \text{ m}$ bei einer Trägheitsbewegung ohne Biegungs-Schwingungs-Bewegungen des Korpus dar [10]. Die errechneten Werte des Widerstandskoeffizienten eines Delfins, der sich durch Trägheit ohne Biegungs-Schwingungs-Bewegungen des Korpus bewegt, beginnen bei $Re = 2,5 \cdot 10^6$, steigen allmählich an und nähern sich dabei den Werten des Widerstandskoeffizienten eines technisch glatten Festkörpers bei vollständiger turbulenter Umströmung in Kurve 8 an. Kurve 4 wurde aus Werten für den Widerstandskoeffizienten gebildet, die einem Festkörpermodell des Delfins mit Berücksichtigung des zusätzlichen Flossenwiderstandes bei turbulenter Umströmung des Modells in seiner gesamten Länge entsprechen und mit Hilfe des Computers errechnet wurden [10]. Es ist anzumerken, dass das Profil des Rotationskörpers, das für die Berechnung verwendet wurde, nicht vollständig mit dem Profil des Delfinkörpers übereinstimmte, besonders im Bereich der „Delfinnase“. Dies führte zu einer geringfügigen Druckumverteilung auf der Körperoberfläche des Modells und zur Veränderung seines Widerstandskoeffizienten. Außerdem wurde die Stellung der Brustflossen des Delfins auf den verwendeten Filmbildern nicht angegeben. Experimentelle Messungen haben aber gezeigt, dass die Auftriebszahl an den Brustflossen um das dreißigfache variiert, wenn sich der Anstellwinkel von 0° auf 6° ändert [16]. Deshalb ist der Fehler für die Werte in Kurve 3 unbestimmt.

Kurve 5 der grafischen Darstellung zeigt die Widerstandskoeffizienten für einen Schleppversuch mit einem toten Schweinswal mit den Hauptkorpusmaßen $L \times B \times H = 1 \times 0,21 \times 0,25 \text{ m}$ ohne Biegungs-Schwingungs-Bewegungen des Körpers [5]. Es ist jedoch anzumerken, dass sich beim Schleppversuch eine Stange an der Nase des Delfins befand, die eine Verwirbelung der Korpusumströmung erzeugte. Da der Tiefgang des Modells gering war ($0,5 \text{ m}$), lässt sich der schnelle Anstieg der Werte des Widerstandskoeffizienten bei $Re > 10^6$ weitgehend durch den mutmaßlichen Einfluss der freien Oberfläche auf die Messergebnisse erklären.

In Kurve 6 der grafischen Darstellung werden die Versuchsergebnisse für das Modell „Dolphin“ mit einer Länge von $L=1,6 \text{ m}$ und einer Korpus-Linienführung in

Form eines Rotationskörpers mit dem Profil NACA 66 dargestellt [7]. Die Widerstandskoeffizienten nach der Wasserverdrängung des Modells, die in [7] aufgeführt werden, wurden auf eine Größe der benetzten Oberfläche von $\Omega = 1,69 \text{ m}^2$ umgerechnet und in Kurve 6 dargestellt. Derart niedrige Werte für den Widerstandskoeffizienten lassen sich dadurch erklären, dass im Bereich der Reynoldszahl $Re = 2 \cdot 10^6 - 4 \cdot 10^6$ die laminare Umströmung des Modells auf fast 60% der Gesamtlänge erhalten bleibt [7]. Durch die Stromlinienform des Delfinkörpers kann in der Technik ein Strömungswiderstandsgewinn von bis zu 60% erzielt werden [15]. Dies wird durch die Arbeiten von Hertel [13] bestätigt, in denen die Verwendung einer laminarisierten Delfinkörperform für den Rumpf von Flugzeugen begründet wird. Es muss jedoch darauf hingewiesen werden, dass laminarisierte Formen nur bei hydraulisch glatten Oberflächen, ablösungsfreier Umströmung und bestimmten Reynoldszahlen [3] von entscheidendem Vorteil sind.

Die Kurven 11 und 12 der grafischen Darstellung zeigen die Ergebnisse von Versuchen mit Rotationskörpern mit großer Streckung $\left(\frac{L}{D}\right) = 38$ und einer künstlichen elastischen Oberfläche, die die Hautdecke des Delfins imitiert [14]. Es wurden zylindrische Modelle mit der Länge $L=2,44 \text{ m}$ und einem Durchmesser von $0,051 \text{ m}$ mit konischem Bugbereich untersucht. Kurve 11 zeigt Versuchsergebnisse von Modellen mit einer elastischen Ummantelung, die das zylindrische Funktionsteil vollständig bedeckt und mit ihren elastischen Eigenschaften der Delfinhaut am ähnlichsten ist. Die dreischichtig aufgebaute Ummantelung hatte eine Steifigkeit von $16,3 \cdot 10^7 \text{ N/m}^3$, die relative Dämpfung betrug 57% und der Elastizitätsmodul $E = 57,8 \cdot 10^4 \text{ N/m}^2$. Entsprechend den Literaturangaben in [1] gilt für Hautdecke eines Delfins in Ruhelage $E = 10,1 \cdot 10^4 \text{ N/m}^2$ und für die Flossenhaut $E = 37,3 \cdot 10^4 \text{ N/m}^2$. Die besten Resultate in Hinblick auf die Verringerung des Widerstandes wurden mit einer Ummantelung mit analoger Struktur und einer Steifigkeit von $43,5 \times 10^7 \text{ N/m}$, einer relativen Dämpfung von 47%, einem Elastizitätsmodul $E = 154,6 \cdot 10^4 \text{ N/m}^2$ und einer Viskosität der Dämpfungsflüssigkeit des Füllmittels von 300 cSt (Kurve 12) erzielt. Dabei war der Widerstand des Modells nur halb so groß wie bei analogen Festkörpermodellen. Wie die Berechnungen gezeigt haben [14], verringert sich der Widerstand auf Grund der Laminarisierung der Grenzschicht (bei $Re=1,5 \cdot 10^7$ war die Grenzschicht auf 83% der Gesamtlänge des Modells laminar).

Bevor wir zu den Schlussfolgerungen kommen, muss darauf hingewiesen werden, dass es in der Literatur nur wenig Angaben zum Widerstandskoeffizienten eines Delfins in Bewegung gibt und dass nur vereinzelt Berechnungsverfahren und Versuchstechniken dargestellt werden. Ausgehend von den in der Arbeit dargestellten Ergebnissen und der Analyse der in der grafischen Darstellung gezeigten Abhängigkeiten des Koeffizienten ξ von der Reynoldszahl kann man vorläufig zu dem Schluss kommen, dass bei der Bewegung eines Delfins oder eines analogen Körpers ohne Biegungs-Schwingungs-Bewegungen des Korpus dessen Werte des Widerstandskoeffizienten geringer sind, als bei einem äquivalenten festen Körper mit vollständiger turbulenter Umströmung. Beim Auftreten intensiver Biegungs-Schwingungs-Bewegungen des Delfinkörpers mit hoher Amplitude steigen die Werte des Widerstandskoeffizienten an. Aber auch letztere Schlussfolgerung ist kritisch zu betrachten, weil der Delfin in einem Fall [17] im aktiven Bremsvorgang mit Hilfe seines Bewegungskomplexes schwimmt und weil die Werte, die in Kurve 1 dargestellt sind,

zu hoch sind. Gleichzeitig scheinen die Angaben in der Literatur [5; 7; 10; 14] methodologisch zuverlässiger zu sein, da diese bei stationärer Bewegung der Versuchsobjekte ermittelt wurden. Hervorzuheben ist, dass in dieser Messgruppe die im Vergleich zu Kurve 8 geringeren Werte für den Widerstandskoeffizienten sowohl auf Grund der optimalen Form [5; 7; 10] als auch der wegen der Elastizitäts- und Dämpfungseigenschaften der Oberfläche [5; 10; 14] erreicht wurden.

Dies bestätigt die Schlussfolgerung [2], dass die Bedeutung der Hautdecke des Delfins darin bestehen könnte, dass sie optimale Elastizitäts- und Dämpfungseigenschaften der Haut in einem großen Geschwindigkeitsbereich gewährleistet, die Umströmung ablösungsfrei erhält und damit die Effektivität der laminarisierten Körperform bei Biegungs-Schwingungs-Bewegungen des Körpers steigert. Die Effektivität der laminarisierten Körperform des Delfins erhöht sich, wenn sich der Delfin bei der Bewegung entlang seiner Trajektorie mit einem relativ zu ihr gegen Null gehenden Anströmwinkel bewegt und der Trajektorie mit Biegungen seines Körpers folgt. Daraus lässt sich schließen, dass die speziellen Eigenschaften der Oberflächenschicht des Delfins und die laminarisierte Korpusform notwendige Bedingungen für die Verringerung des Bewegungswiderstandes des Delfins sind.

Die Ermittlung von weiteren Werten an einer größeren Anzahl von Versuchstieren würde eine genauere Bestimmung des tatsächlichen Wertes des Widerstandskoeffizienten eines sich aktiv bewegenden Delfins ermöglichen, damit ließe sich auch die tatsächliche Leistung feststellen, die der Delfin für die Bewegung aufwendet. Der Autor bedankt sich beim Kandidat der technischen Wissenschaften V. V. Babenko für die zahlreichen wertvollen Ratschläge.

Literatur

1. Babenko, V. V.; Gniteckij, N. A.; Kozlov, L. F.: Predvaritel'nye rezul'taty issledovanij uprugich svojstv koži živych del'finov. - In: Bionika. Kiev, 3 (1969) S. 12 - 19.
/Preliminary results of elastic properties investigation of living dolphins' skin; russ./
2. Babenko, V. V.; Surkina, R. M.: Nekotorye gidrodinamičeskie osobennosti plavanija del'finov. In: Bionika. Kiev, 3 (1969) S. 19.
/Some hydrodynamic peculiarity of dolphins swimming; russ./
3. Bogdanova, Z. V. - In: Trudy. Central'nyj naučno-issledovatel'skij institut morskogo flota, Izd. CNIIMF, Leningrad, 1964, Bd. 54.
4. 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./
5. Kozlov, L. F.; Pjateckij, V. E.; Savčenko, Ju. N.: In: Mechanizmy peredviženija i orientacii životnych. Kiev: Naukova dumka, 1968.
/Fortbewegungs- und Orientierungsmechanismen von Tieren; russ./
6. Loginovič, G. V.: Gidrodinamika tonkogo gibkogo tela (Ocenka gidrodinamiki ryb). - In: Bionika. Kiev, (1970) Nr 4, S. 5 - 11.
Hydrodynamik eines dünnen biegsamen Körpers (Einschätzung der Hydrodynamik von Fischen); russ./

7. Petrova, I. M.: Gidrobionika v sudostroenii. Leningrad: Central'nyj naučno-issledovatel'skij institut informacii i tehniko-ékonomikeskich issledovanij, 1970, 272 S.
/Hydrobionik im Schiffbau; russ./
8. Pjateckij, V. E.: Gidrodinamičeskie charakteristiki plavanija nekotorych bystrochodnych ryb. - In: Bionika. Kiev, (1970) Nr 4, S. 20 – 27.
/Hydrodynamic characteristics of swimming of some fast swimming salt-water fish; russ./
9. Pjateckij, V. E., Kajan, V. P.: Nekotorye kinematičeskie charakteristiki plavanija del'fina azovki. - In: Bionika. Kiev, (1972) Nr 6, S. 18 - 22.
/Some kinematic characteristics of Phocoena phocoena; russ./
10. Semenov, B. N.: O suščestvovanii gidrodinamičeskogo fenomena del'fina afalina. In: Bionika. Kiev, (1969) Nr 3, S. 54 - 61.
/Über die Existenz eines hydrodynamischen Phänomens beim Großen Tümmler; russ./
11. Semenov, N. P.; Babenko, V. V.; Kajan, V. P.: Èksperimental'nye issledovanija nekotorych osobennostej gidrodinamiki plavanija del'finov. - In: Bionika. Kiev, (1974) Nr 8, S. 23 - 31.
Englisch: Experimental research on some features of dolphin swimming hydrodynamics. - Translation from Russian into English. 11 p. 27 refs. from Delft Technical University BTUD, National Technical Information Service Operation Division, British Library Document Supply Centre as JPRS-63492 p 16 - 26.
12. Schlichting, G.: Teorija pograničnogo sloja. Moskva: Nauka, 1969.
Dt.: Schlichting, H.: Grenzschicht-Theorie. Karlsruhe: Braun, 1982.
13. Hertel, H.: Struktur, Form, Bewegung. Bd. 1, Biologie und Technik, Mainz: Krausskopf, 1963.
14. Kramer, M. O.: Boundary Layer Stabilization by Distributed Damping. - In: Journal of the American Society of Naval Engineers. Washington, D. C., 72, 1960, 1, S. 25 - 34.
15. Kramer, M. O.: Advances in Hydroscience. New York and London: Academic Press, Bd. 2, 1965, S. 111 – 130.
16. Lang, T. G.: Hydrodynamic Analysis of Dolphin Fin Profiles. - In: Nature, London: Nature Publishing Group, 1966, Bd. 209, Nr. 5028, S. 1110 - 1111.
17. Niiler, P. P.; White, H. J.: Note on the swimming deceleration of a dolphin. - In: Journal of Fluid Mechanics, Cambridge: Cambridge University Press, 1969, 38, N3, p. 613 - 617.

Institut für Hydromechanik
der Akademie der Wissenschaften
der Ukrainischen Sowjetrepublik

Redaktionseingang
15. Januar 1973

Stuttgart, 19. Juli 2005
Übersetzt von:
Sören Ludwig