

Kajan, V. P.:

Über die hydrodynamischen Kennwerte des Flossenvortriebs bei Delfinen

Deutsche Vollübersetzung aus:

Bionika. Kiev: Izd. Naukova Dumka, 1979, Bd. 13, S. 9 - 15.

Russisch:

О гидродинамических характеристиках плавникового движителя дельфина

О гидродинамических характеристиках плавникового движителя дельфина

Die hydrodynamische Untersuchung des schnellen Schwimmens von Wassertieren ist für Forscher, die auf dem Gebiet der Hydrobionik arbeiten, von großem Interesse. Besondere Beachtung finden dabei Tiere (insbesondere Delfine), die sich mit Hilfe von Biegungs-Schwingungs-Bewegungen der Schwanzflosse, ähnlich dem Flügelschlag, fortbewegen.

In der Vergangenheit haben wir auf der Grundlage der Theorie von Loginovič [7] die hydrodynamischen Kennwerte der Kinematik der Biegungs-Schwingungs-Bewegungen des ganzen Delfinkörpers für das Schwimmen des Großen Tümmlers rechnerisch ermittelt [4]. Es wurden Werte für die Vortriebskraft und den idealen Wirkungsgrad des Delfinantriebs bestimmt, außerdem die Koeffizienten des hydrodynamischen Widerstands eines Delfins als Funktion der Reynoldszahl und der mittleren positiven oder negativen Änderung der Schwimmgeschwindigkeitswerte innerhalb einer Schwingungsperiode [5].

Da aber eine Reihe von Annahmen in die Berechnungsformeln eingegangen ist, wäre es interessant, wenn man zum Vergleich dieselben Kennwerte mit Hilfe einer anderen Methode ermitteln könnte. Im Folgenden zeigen wir Berechnungsergebnisse für die vortriebsrelevanten Kennwerte einer Delfinschwanzflosse, die wie ein schlagender Flügel mit Hilfe der bekannten Korrelation zwischen Vertikal- und Rotationsschwingungen arbeitet. Zur Berechnung wurde ein Verfahren verwendet, das auf einem hypothetisch stationären Zustand beruht, d. h. es wird angenommen, dass die momentanen Kräfte, die auf dem Flügel bei der Umströmung mit einem nichtstationären Flüssigkeitsstrom entstehen, nur durch die Werte des momentanen Anstellwinkels α_i und der Geschwindigkeit V_i der Flügelbewegung bestimmt werden.

Die Grundlagen der Theorie des schwingenden Flügels basieren auf Arbeiten von A. I. Nekrasov [8] und L. I. Sedov [10]. Experimentelle Untersuchungen zur Erforschung der Kräfte und Momente, die an einem starren Flügel entstehen, der in einer Flüssigkeit rotiert und vertikale Schwingungen ausführt, wurden über die Jahre hinweg von H. Hertel [14], Ju. N. Savčenko [9], Ė. P. Grebešov und O. A. Sagojan [3] durchgeführt. Es wurden Flügel mit rechteckigem [3; 14], elliptischem oder dreieckigem Grundriss mit geringer Flügelstreckung [9] untersucht.

Da es in der Literatur keine Angaben zu den hydrodynamischen Kennwerten der Schwanzflosse von Delfinen gibt, wurden für die Berechnung einige Vereinfachungen vorgenommen. Es wurde angenommen, dass es ein starrer Flügel sei, und der natürliche Grundriss der Schwanzflosse des Großen Tümmlers wurde durch einen Pfeilflügel mit gleichem Flächeninhalt $S=0,077m^2$, gleich großer Schwanzwurzelprofilsehne (root cord) $b_1=0,236m$, einer Streckung von $\lambda = l^2 / s = 4$ und einer Zuspitzung von $\eta = \frac{b_1}{b_2} = 4$ ersetzt, wobei $l=0,52 m$ die Flügelspannweite und $b_2 = 0,52m$ die Endprofilsehne des Flügels sei (Abb. 1). Die mittlere aerodynamische Profiltiefe b_{maP} dieses Flügels wurde nach bekannter Vorgehensweise [1] bestimmt und beträgt 0,164 m.

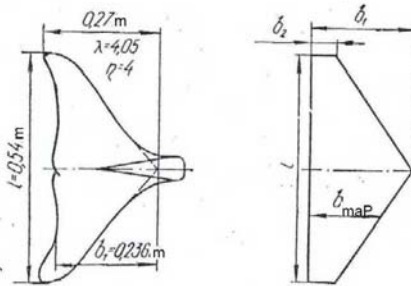


Abb. 1: Form der Schwanzflosse eines Großen Tümmlers und eines Pfeilflügels mit gleichem Flächeninhalt in der Draufsicht

Als Flügelprofil wurde aus dem Katalog das symmetrische Profil NACA-0018 [6] ausgewählt, dessen aerodynamische Kennwerte für einen rechteckigen Flügel mit $\lambda=6$ bekannt sind und in Abb. 2 dargestellt werden (C_y - Auftriebskoeffizient; C_x - Widerstandskoeffizient; $k = \frac{C_y}{C_x}$ - Flügelqualität; α - Anstellwinkel des Flügels).

Grundlage dafür, dass gerade das Profil NACA-0018 ausgewählt wurde, ist die Abb. 3. Im vorderen Teil stimmen die Profile 3 und 4 fast vollständig überein, im hinteren Teil divergieren die Profile geringfügig.

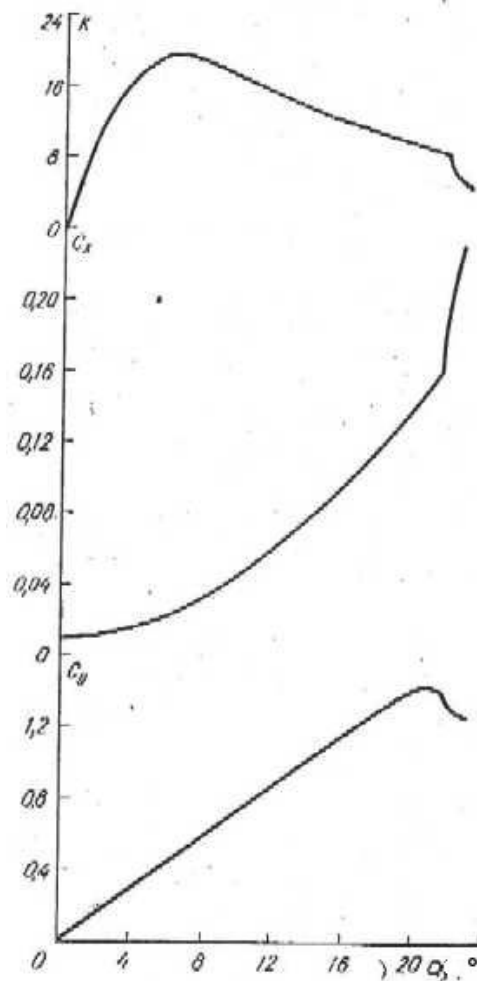


Abb. 2: Abhängigkeit der aerodynamischen Koeffizienten und der Qualität vom Anstellwinkel α

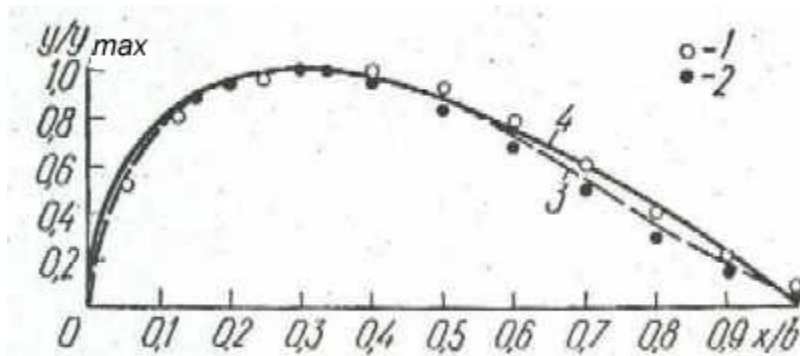


Abb. 3: Vergleich der Profile einer Schwanzflosse mittlerer Spannweite von einem gewöhnlichen Delfin (1) [11], einem Dall-Schweinswal (2) [15] und von deren Mittelwerten (3) mit dem Profil NACA-0018 (4) [6].

Die Änderung der hydrodynamischen Flügelkoeffizienten beim Übergang vom rechteckigen Grundriss mit $\lambda = \infty$ zum pfeilförmigen mit $\lambda=4$ und $\eta=4$ wird in Abb. 4 dargestellt. Die Grafik stellt die Abhängigkeiten $C_y(\alpha)$ und $C_y(C_x)$ dar, die durch Anströmung flügelartiger Platten mit unterschiedlichem Grundriss im Windkanal ermittelt wurden. So erhalten wir durch Einführung des Korrekturfaktors in die Abhängigkeiten $C_y(\alpha)$ und $C_y(C_x)$ - dargestellt in der Abb. 2 - die Abhängigkeiten C_x und C_y für einen starren Flügel der von uns angenommenen Grundrissform mit dem Profil NACA-0018.

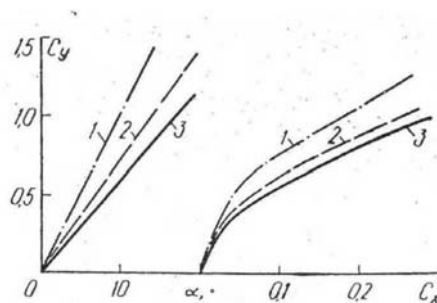


Abb. 4: Aerodynamische Kennwerte einer Platte mit rechteckigem oder gepfeiltem Flügelgrundriss:

1 - Rechteckflügel mit $\lambda = \infty$; 2 - mit $\lambda = 6$; 3 - Pfeilflügel mit $\lambda = 4$, $\eta = 4$.

Auf diese Weise kann man mit Hilfe der folgenden Formeln [1] für jeden Zeitpunkt die hydrodynamischen Kräfte auf diesem Flügel bestimmen:

$$X_i = C_{xi} \frac{\rho V_i^2}{2} S, \quad (1)$$

$$Y_i = C_{yi} \frac{\rho V_i^2}{2} S. \quad (2).$$

Die unbekanntenen Größen α_i und V_i bestimmen wir mit Hilfe der Bahnkurve der Schwanzflossenbewegung des Delfins, die wir durch Filmaufnahmen im biohydrodynamischen Kanal ermittelt haben [12; 13]. Die Versuche wurden mit sechs Großen Tümmlern mit der Länge $L=2,35 - 2,65$ m durchgeführt [5]. Die Kinematik der Schwanzflossenbewegung des Versuchstieres wurde mit einer Filmkamera Modell "Konvas-avtomat" mit einem Kameraobjektiv vom Typ RO-33M und einer Brennweite von 50 mm aufgezeichnet. Zur Registrierung der Zeitintervalle zwischen den Filmbildern wurde ein elektrischer Zeitmesser verwendet [12].

Zur weiteren Auswertung wurden Durchläufe ausgewählt, in denen sich der Delfin geradlinig bewegt und das Schwanzflossenblatt keine Drehbewegungen um die Schwanzwurzelprofilesehne ausführt, d. h. die Schwanzflosse wurde nur mit dem Wurzelprofil auf die Diametralebene XOY projiziert, wobei das Wurzelprofil durch eine Gerade mit der Länge der Wurzelprofilesehne ersetzt wurde (Abb. 5 a).

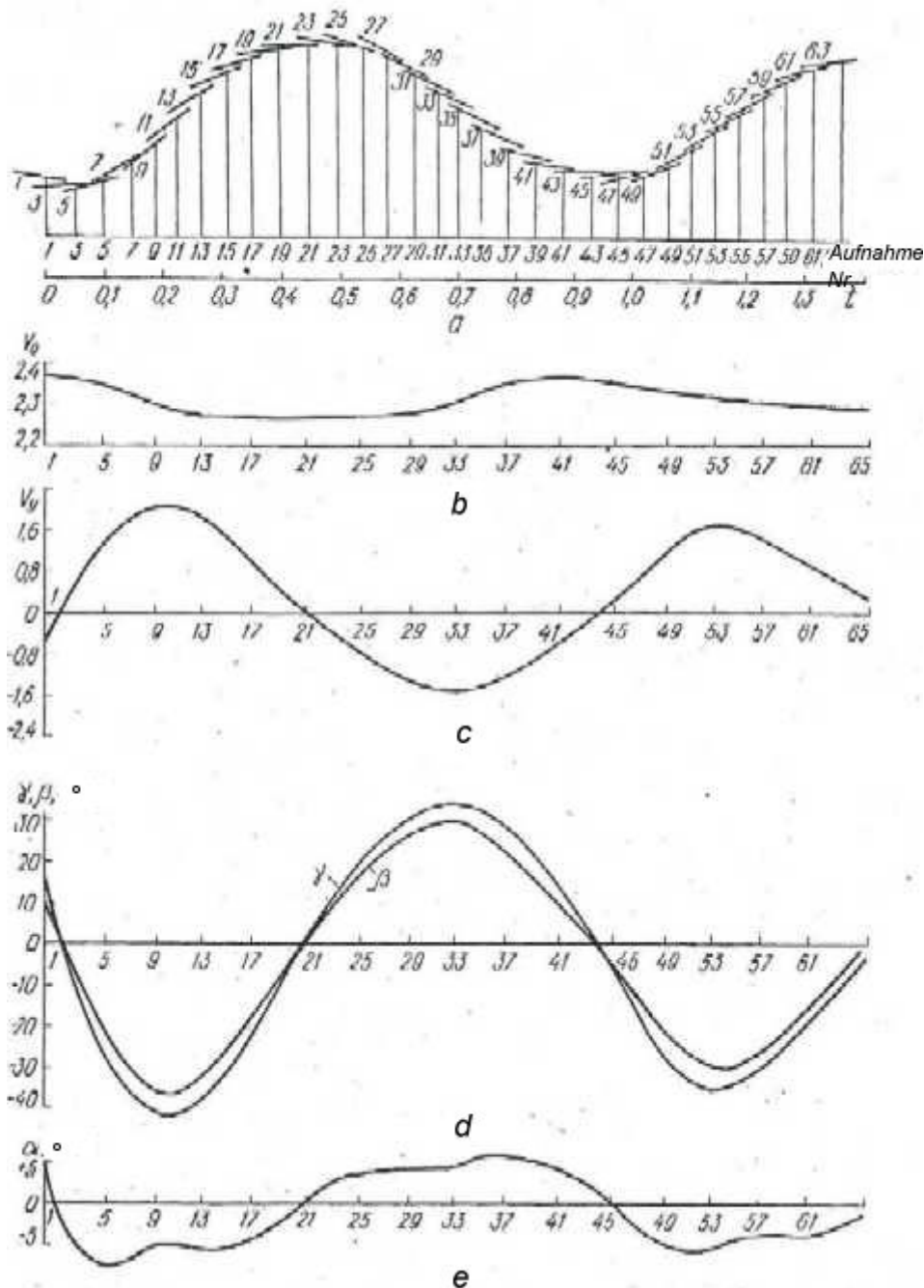


Abb. 5: Kinematische Kennwerte der Schwanzflossenbewegung eines Delfins

Auf der Abszissenachse sind der Weg, den die Schwanzflosse in Längsrichtung zurücklegt, die Anzahl der Filmbilder und die Zeit t in Sekunden

dargestellt, auf der Ordinatenachse die Amplitude der vertikalen Schwingungen A_0 der Schwanzflosse des Delfins. Die Änderung der Schwimmggeschwindigkeit V_0 des Delfins wird in Abb. 5 b gezeigt und die Geschwindigkeit V_y der Hubbewegung der Schwanzflosse in der Vertikalebene im Verlauf einer Schwingungsperiode in Abb. 5c, wobei die Kurve $V_y(t)$ den gleichen Charakter wie die Abhängigkeit $A_0(t)$ hat, aber um $\frac{\pi}{2}$ phasenverschoben ist. Die Hubgeschwindigkeit der Flosse wird als Funktion der Amplitude der vertikalen Schwingungen bestimmt:

$$V_y = \frac{\partial A_0}{\partial t} = f(A_0). \quad (3)$$

Die momentane Bewegungsgeschwindigkeit des Druckmittelpunktes der Schwanzflosse wird mit Hilfe der Formel

$$V_i = \sqrt{V_0^2 + V_y^2} \quad (4)$$

errechnet. Den Anstellwinkel α eines starren Pfeilflügels (hier Anstellwinkel der Wurzelprofilsehne) finden wir als Differenz zwischen dem induzierten Anstellwinkel der Strömung γ (d. h. dem Neigungswinkel des momentanen Geschwindigkeitsvektors gegenüber der Richtung der Translationsbewegung des Delfinkörperschwerpunkts) und dem Anstellwinkel des Flügels β (d. h. dem momentanen Neigungswinkel der Profilsehne gegenüber der Richtung der Translationsbewegung des Delfinkörperschwerpunkts). In Abb. 5 d wird ein Beispiel für die Veränderung der Winkel γ und β innerhalb einer Schwingungsperiode der Schwanzflosse gezeigt.

Den Winkel γ erhalten wir aus dem Verhältnis der Geschwindigkeiten V_0 und V_y :

$$\tan \gamma = -\frac{V_y}{V_0} \quad (5)$$

und den Winkel β auf graphischem Wege unmittelbar aus der Bahnkurve der Schwanzflosse (Abb. 5 a). Der Winkel β ist zugleich die Amplitude der Winkelschwingungen des Profils um seinen Druckmittelpunkt. Aus dem Vergleich der Abb. 5 a und 5 d folgt, dass der Phasenwinkel δ der Verschiebung zwischen der vertikalen Schwingung und Rotation des Profils gleich $\frac{\pi}{2}$ ist. Für den Fall, dass δ variabel ist, entspricht dies bei gleichen übrigen Bedingungen dem maximalen Wirkungsgrad eines Flügelschlagantriebs [3].

Der Veränderungscharakter des Profilanstellwinkels α im Verlauf einer Schwingungsperiode der Schwanzflosse, der mit Hilfe des oben beschriebenen Verfahrens ermittelt wurde (d.h. $\alpha = \gamma - \beta$), wird in Abb. 5 e dargestellt. Im Verlauf jeder Schwingungshalbperiode hat die graphische Darstellung $\alpha(t)$ ein ausgeprägtes Maximum in Form eines Plateaus, immer genau dann, wenn die Hubgeschwindigkeit V_y der Schwanzflosse ihren größten Wert erreicht. Die maximale Größe des Winkels α , die wir aus den Bahnkurven der Schwanzflossen der Delfine ermittelt haben, liegt in der Regel nicht über 10° , die mittleren Werte bewegen sich in den Grenzen von $4 - 6^\circ$. Den Angaben von Lang [15] zufolge, die er mit Hilfe eines Computers für einen Flügel mit dem Profil der Schwanzflosse eines gewöhnlichen Delfins errechnet hat

(Kurve 2 Abb. 3), entsteht bei einem solchen Flügel bei $\alpha = 4^\circ$ und $V_i = 11,7 \text{ m/s}$ sowie bei $\alpha = 6^\circ$ und $V_i = 9,9 \text{ m/s}$ Kavitation (das entspricht in unserem Fall einer Schwimmggeschwindigkeit des Delfins V_0 von ungefähr $9,5 \text{ m/s}$ beziehungsweise $8,0 \text{ m/s}$). Die Kavitationsbildung an der Schwanzflosse kann für den Delfin sehr schmerzhaft sein.

Da nun für jeden Zeitpunkt der Anstellwinkel und die momentane Geschwindigkeit der Flügelbewegung bekannt sind, können jetzt mit Hilfe der Formeln (1) und (2) die hydrodynamischen Kräfte X und Y bestimmt werden. Projiziert auf die horizontale und vertikale Achse und integriert über die Schwingungsperiode τ erhalten wir die Mittelwerte der horizontalen Vortriebskraft $\{T\}$ und der Querkraft $\{F\}$:

$$\{T\} = \frac{1}{\tau} \int_0^\tau Y_i \sin \gamma_i - X_i \cos \gamma_i dt; \quad (6)$$

$$\{F\} = \frac{1}{\tau} \int_0^\tau Y_i \cos \gamma_i + X_i \sin \gamma_i dt; \quad (7).$$

Für den in Abb. 5 dargestellten Fall beträgt die mittlere horizontale Vortriebskraft des Flossenantriebs eines Delfins mit der Länge $L=2,4 \text{ m}$ und dem Gewicht $G=140 \text{ kp}$ innerhalb einer Schwingungsperiode $2,2 \text{ kp}$.

Da die Translationsbewegung des Delfins in der Regel instationär ist, bestimmen wir bei der Auswertung der graphischen Darstellungen innerhalb einer Schwingungsperiode die mittlere Änderung der Geschwindigkeit $\{V\}$ und der Kraft $\{R_i\}$, die für die Überwindung der Trägheitskräfte nötig ist:

$$\{R_i\} = m_D(1 + k_H)\{V\}, \quad (8)$$

$m_D = \frac{G}{g}$ sei die Masse des Delfins, k_H der Koeffizient der virtuellen Masse, bestimmt anhand des Nomogramms [2] für den Delfinkörper, der durch einen gleichgroßen Rotationsellipsoiden ersetzt wurde (der Einfluss der Konfigurationsänderung des Delfinkörpers innerhalb einer Schwingungsperiode der Schwanzflosse wurde nicht berücksichtigt).

Die Größe des hydrodynamischen Widerstands erhalten wir aus der Differenz zwischen der Vortriebskraft $\{T\}$ und der Trägheitskraft $\{R_i\}$:

$$\{R\} = \{T\} - \{R_i\}. \quad (9)$$

Die Werte für die Koeffizienten des hydrodynamischen Widerstands der Delfine bestimmen wir nach der Formel

$$\zeta = \frac{2\{R\}}{\rho V_0^2 \Omega}. \quad (10)$$

Die benetzbare Oberfläche des Delfins ("wetted area") Ω bestimmen wir anhand der Ergebnisse der durchgeführten Rumpf- und Flossenvermessungen [5]. In Abb. 6 werden durch die Punktereihen 3 - 7 Ergebnisse dargestellt, die zu einem früheren Zeitpunkt [5] mit Hilfe der Formel von Loginovič zur Kinematik der Biegungs-Schwingungs-Bewegungen des Delfinkörpers bei unterschiedlicher Beschleunigung

der Translationsbewegung ermittelt wurden. Die zusätzlich eingekreisten Punkte zeigen die Werte ζ , die mit Hilfe des oben beschriebenen Verfahrens ermittelt und nach der Formel (10) errechnet wurden. Die Abhängigkeiten des Widerstandskoeffizienten eines festen Körpers mit einer dem Delfin äquivalenten Form und (benetzten) Körperoberfläche ("wetted area") von der Reynoldszahl bei vollständiger turbulenter und laminarer Umströmung werden durch die Kurven 1 und 2 dargestellt.

Die mit Hilfe des quasistationären Verfahrens ermittelten hydrodynamischen Widerstandskoeffizienten eines Delfins, dessen Antrieb laut Annahme nach dem Prinzip des Flügelschlags funktioniert, sind in allen Fällen ungefähr doppelt so groß wie die Koeffizienten, die für die gleichen Schwimmdurchläufe eines Delfins ermittelt wurden, dessen Vortrieb durch Biegungs-Schwingungs-Bewegungen des gesamten Körpers erzeugt wird (Punktereihen 3 - 6).

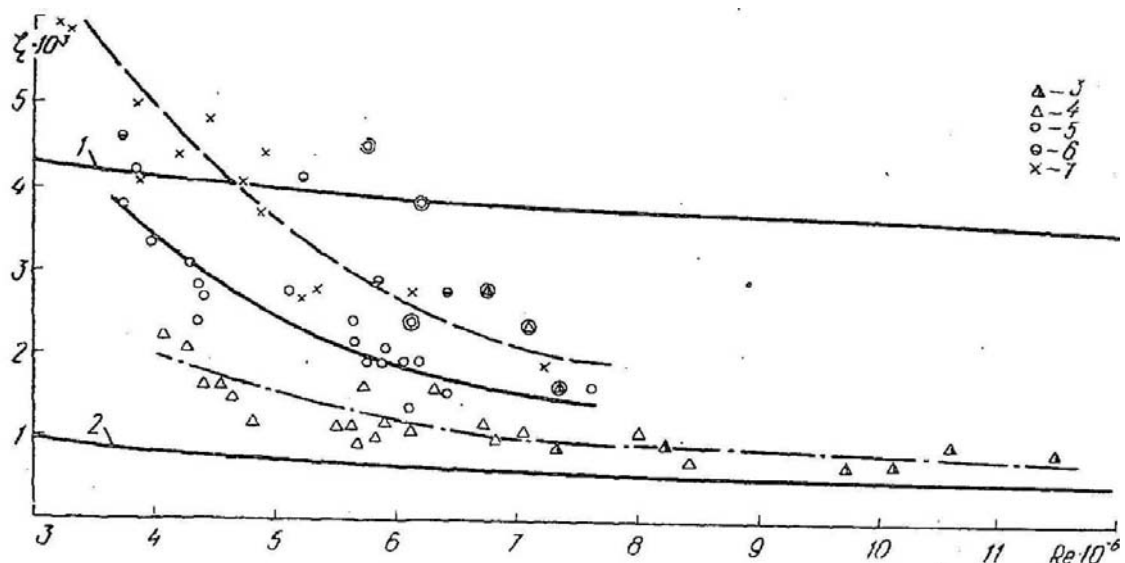


Abb. 6: Abhängigkeit des hydrodynamischen Widerstandskoeffizienten eines Delfins von der Reynoldszahl und der mittleren Beschleunigung der Bewegung:

1 - bei turbulenter Umströmung; 2 - bei laminarer Umströmung; 3 - $V = (0,35 - 0,70) \text{ m/s}^2$; 4 - $V = (0,10 - 0,30) \text{ m/s}^2$; 5 - $V = (0 - 0,07) \text{ m/s}^2$; 6 - $V = -(0,08 - 0,15) \text{ m/s}^2$; 7 - Ausgleitbewegung ohne Antrieb

Die mit Hilfe des quasistationären Verfahrens ermittelten Werte kann man als Obergrenze des Koeffizienten ζ betrachten, da sich durch die oben getroffenen Annahmen und Vereinfachungen die Werte der aerodynamischen Koeffizienten C_x und C_y erhöhen, die der Berechnung der hydrodynamischen Kräfte an einem schlagenden Flügel zu Grunde liegen. Auf diese Weise zeigt die Analyse des Filmmaterials, dass sich mit steigender Momentangeschwindigkeit der Delfinschwanzflosse V_i die Krümmung am hinteren Flossenrand vergrößert und somit auch der Anstellwinkel des großflächigen hinteren Teils der Flosse. Dies führt zu einer Verringerung der hydrodynamischen Kräfte X und Y auf den elastischen Flügel im Vergleich zum starren Flügel und dementsprechend zur Verringerung der Vortriebskraft $\{T\}$ des Delfins bei ansonsten gleich bleibenden Bedingungen. Auf der Grundlage des Dargestellten lässt sich vermuten, dass sich der tatsächliche Wert des hydrodynamischen Widerstandskoeffizienten eines Delfins bei gleichmäßiger Schwimmbewegung mit Reynoldszahlen $Re = (5 \div 9) \cdot 10^6$ in den Grenzen von

$(3 \div 1,5) \cdot 10^{-3}$ bewegt und eine Tendenz zur Verringerung bei steigender Reynoldszahl hat.

Der Ergebnisvergleich der Delfinvortriebsberechnung mit zwei verschiedenen Verfahren zeigt eine gute Übereinstimmung und liefert uns die Ober- und Untergrenze der realen Werte der Vortriebskraft. Die reale Schwanzflosse des Delfins hat eine elastische Oberfläche, ist im Profil biegsam und hat fließendere Umrissformen in der Draufsicht. Deshalb lassen sich genauere Daten mit Hilfe des oben beschriebenen Verfahrens erst ermitteln, wenn Modelle realer Delfinschwanzflossen im hydrodynamischen Kanal umströmt werden und eine genauere Bestimmung des Bahnkurvenverlaufs der Delfinschwanzflosse durch Stereofilmaufnahmen (Raumbildfilmaufnahmen) erfolgt.

Literatur

1. Андриевский, В. В.; Белоконов, В. М.; Бочкарев, А. Ф.; Климов, В. И.: Аеромеханика самолета. - Москва: Машиностроение. 1977. - 416 с.
Andrievskij, V. V.; Belokonov, V. M.; Bočkarev, A. F.; Klimov, V. I.: Aéromechanika samoleta. Moskva: Mašinstroenie. 1977. - 416 S.
/Aeromechanik des Flugzeugs; russ./
2. Войткунский, Я. И.; Першиц, Р. Я.; Титов, И. А.: Справочник по теории корабля. Л.: Судпромгиз, 1960. 504 с.
Vojtkunskij, Ja. I.; Peršic, R. Ja.; Titov, I. A.: Spravočnik po teorii korablja. Leningrad: Sudpromgiz, 1960. 504 S.
/Handbuch zur Theorie des Schiffbaus; russ./
3. Гребешов, Э. П.; Сагоян, О. А.: Гидродинамические характеристики колеблющегося крыла, выполняющего функции несущего элемента и движителя.-Тр. ЦАГИ, № 1725, с. 3 - 30.
Grebešov, Ė. P.; Sagojan, O. A.: Gidrodinamičeskie charakteristiki kolebljuščegosja kryla, vypolnjajuščego funkcii nesuščego élementa i dvižitelja. In: Trydy. Central'nyj aéro-gidrodinamičeskij institut imeni N. K. Žukovskogo, Nr 1725, S. 3-30.
/Hydrodynamische Kennwerte eines schlagenden Flügels als tragendes Element mit Antriebsfunktion; russ./
4. 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, vyp. 11, S. 36-41.
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, Übersetzungsstelle der Universitätsbibliothek Stuttgart.
5. Каян, В. П.; Пятецкий, В. Е.: Гидродинамические характеристики дельфина афалины при различных режимах ускорения. Бионика, 1978, вып. 12, с. 48-55.
Kajan, V. P.; Pjateckij, V. E.: Gidrodinamičeskie charakteristiki del'fina afaliny pri različnych režimach uskorenija. In: Bionika, Kiev: Izd. Naukova Dumka, 1978, vyp. 12, S. 48-55.
Kajan, V. P.; Pjateckij, V. E.: Hydrodynamische Charakteristika des Großen Tümmlers bei unterschiedlichen Beschleunigungsarten. Deutsche Vollübersetzung aus dem Russischen Übersetzung Nr. Ü/574, Übersetzungsstelle der Universitätsbibliothek Stuttgart.

6. Кравец, А. С.: Характеристики авиационных профилей. М.; Л.: Оборонгиз, 1939.- 264 с.
 Kravec, A. S.: Charakteristiki aviacionnyh profilej. Moskva, Leningrad: Oborongiz, 1939. 264 S.
 /Kennwerte von Flugzeugprofilen; russ./
7. Логинович, Г. В.: Гидродинамика плавания рыб. Бионика, 1973, вып. 7, с. 3-8.
 Logvinovič, G. V.: Hidrodinamika plavanija ryb. In: Bionika, Kiev: Izd. Naukova Dumka, 1973, vyp. 7, S. 3-8.
 /Hydrodynamik des Schwimmens von Fischen; russ./
8. Некрасов, А. И.: Теория крыла в нестационарном потоке. Москва: Изд-во АН СССР, 1947. 258 с.
 Nekrasov, A. I.: Teorija kryla v nestacionarnom potoke. Moskva: Isd-vo AN SSSR, 1947. 258 S.
 /Theory of unsteady flow past a wing; russ./
9. Савченко, Ю. Н.: Экспериментальное исследование гидромеханики машущего крыла: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. - Киев, 1970. - 18 с.
 Savčenko, Ju. N.: Ėksperimental'noe issledovanie gidromechaniki mašuščego kryla: Avtoref. dis. ... kand. techn. nauk. - Kiev, 1970. - 18 S.
 /Experimentelle Untersuchungen zur Hydromechanik eines schlagenden Flügels. Dissertation zur Erlangung des Titels "Kandidat der technischen Wissenschaften"; russ./
10. Седов, Л. И.: Плоские задачи гидродинамики и аэродинамики.-Москва: Наука, 1966.- 448 с.
 Sedov, L. I.: Ploskie zadači gidrodinamiki i aerodinamiki. Moskva: Nauka, 1966. 448 S.
 Engl.: Sedov, L. I.: Two-dimensional problems in hydrodynamics and aerodynamics. New York: Interscience Publ., 1965.
11. Першин, С. В.: Гидродинамический анализ профилей плавников дельфинов и китов. Бионика, 1975, вып. 7, с. 26 - 32.
 Peršin, S. V.: Hidrodinamičeskij analiz profilej plavnikov del'finov i kitov. In: Bionika, Kiev: Izd. Naukova Dumka, 1975, vyp. 7, S. 26-32.
 /Hydrodynamic analysis of dolphin and whale fin profiles; russ./
12. 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.: Ėksperimental'nye ustanovki, apperatura i metodika izučenija gidrodinamiki plavanija vodnyh životnyh. 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. 15 p. 16 refs. from Delft Technical University BTUD, National Technical Information Service Operation Division, British Library Document Supply Centre as JPRS-63848 p 49 - 63.

13. 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 English. National Technical Information Service Operation Division, Springfield-Virginia as JPRS-77320.
14. Hertel, H.: Structure, Form and Movement. New York: Reinhold Publ. Corp., 1966. 250 p. /engl./
15. Lang, T. G.: Hydrodynamic analysis of dolphins fin profiles. Nature, 1966, 209, N 5028, p. 1110 - 1111. /engl./

Stuttgart, 29. 06. 2005

Übersetzt von:

(Sören Ludwig)