

Victor Babenko

Hydrobionische Prinzipien der Widerstandsreduktion



Victor Babenko wurde geboren am 14. April 1938. B.Dc. in Maschinenbau am Luftfahrtinstitut Moskau (1963); Ph.D. in Gas- und Strömungslehre (1970) und D.Tech.Sc. (1986) am Institut für Hydromechanik der Nationalen Akademie der Wissenschaften der Ukraine, Kiew. Seit 1990 Professor der Hydromechanik und Hydrobionik am Institut für Hydromechanik, Kiew. Forschungstätigkeit im Flugzeugkonstruktionsbüro Antonov in Moskau (1963–65) und am Institut für Hydromechanik, Kiew (seit 1965). Leiter der Abteilung Hydrobionik und Grenzschichtenkontrolle (seit 1988). Er entwickelte mehrere neuartige Meßtechniken zur Laminarhaltung der Strömung bzw. Turbulenzminimierung. Über 130 wissenschaftliche Aufsätze auf den Gebieten Grenzschichtenströmung, elastische Oberflächen, instationäre Hydrodynamik, Bionik, nicht-newtonische Flüssigkeiten, Strömungskontrolle und Beschreibung von Grenzschichten. Herausgeber der Zeitschriften *Bionika* und *Advanced Hydromechanics*. – Adresse: Institute of Hydromechanics, National Academy of Sciences of Ukraine, 8/4 Zheliabov str., 252057 Kiev, Ukraine. E-mail: babenko@biotics.kiev.ua; bvi@ihm.kiev.ua.

Meine Hauptaufmerksamkeit gilt dem Studium der Wassertiere, vor allem den Besonderheiten der Systeme des Organismus bei der Bewegung, die den Energieverbrauch möglichst niedrig halten. Untersucht werden sollen Delphine als eine Art schnellschwimmender Wassertiere. Besondere Beachtung finden dabei:

- die Krafteinwirkung der umgebenden Umwelt auf den Organismus (da sich die Bewegung auf die Wasserumgebung auswirkt)
- der Einfluß von Geschwindigkeit auf die Systeme des Organismus bei starken Bewegungsantrieb und die spezifische Struktur des Körpers unter dem Aspekt des Zusammenwirkens der verschiedenen Systeme des Organismus

- einige Besonderheiten hydrodynamischer Einwirkung auf den Körper bei der Bewegung im Wasser, sowie gemäß dieser Besonderheiten die Untersuchung der spezifischen Strukturen der Körpersysteme dieser Wassertiere
- die Struktur des Skeletts, die Struktur der Anordnung der Knoten des Nervensystems und der Muskeln nach Länge und Dicke
- die Struktur der Hautdecken
- die Besonderheiten des Blutsystems
- Temperaturmessungen an der Oberfläche der Hautdecken
- direkte und indirekte Messungen aller mechanischen Parameter der Haut, insbesondere der Phasengeschwindigkeit und der Störungsbewegungen in der Grenzschicht
- die Störungsbewegungen in der Grenzschicht in verschiedenen Bewegungsstadien des Delphins
- die Mechanismen der Regulierung der mechanischen Eigenschaften der Haut

Ich möchte zeigen, welche Möglichkeiten der Widerstandsreduktion es bei schnell schwimmenden Tieren gibt.

In den letzten 30 Jahren erzielten Forscher am Hydromechanischen Institut der Nationalen Akademie der Wissenschaften der Ukraine, Kiew und in anderen Instituten Ergebnisse, die das Verhalten von Hochgeschwindigkeitsmeerestieren (Hydrobionten) bei vollkommener Umströmung im Unterschied zum Verhalten ähnlicher, aber harter Körper bei Umströmung demonstrieren. Wir erhielten neue Vorstellungen für die Modellierung der technischen Aufgaben, die den Energieverbrauch möglichst niedrig halten. Eine gut entwickelte bionische Methodik kann eine Brücke zwischen den Forschungen an Meerestieren und der Entwicklung von wirksameren mechanischen Systemen schaffen. Das Wichtigste ist das Verständnis der Hauptprinzipien der Struktur und der Funktion des Organismus.

Entscheidend sowohl für das Verständnis der Besonderheiten der Körperstruktur der Hydrobionten und ihrer Systeme als auch für die Modellierung dieser Besonderheiten in der Technik ist das Studium und die Systematisierung der Prinzipien der Hydrobionten. Die funktionalen Hauptprinzipien der Bionik sind:

1. Das grundlegende Prinzip des lebenden Organismus

Das grundlegende Prinzip der Optimierung lebender Organismen ist ein minimaler Energieverbrauch für die Versorgung des Prozesses der Lebenstätigkeit.

2. Das Prinzip der rezeptorischen Regulierung

Beim Bewegungsprozeß entstehen auf der Körperoberfläche lebender Organismen durch die dynamische Tätigkeit der sie umgebenden Umwelt

schmerzhafte Empfindungen. In einem lebenden Organismus haben sich im Laufe der Evolution Mechanismen herausgebildet, die schmerzhafte Empfindungen abschwächen oder beseitigen.

3. Das Prinzip der Wechselbeziehung (Nachtigal, 1998)

Alle Systeme eines Organismus funktionieren allein in Wechselbeziehungen.

4. Das Prinzip der Polyfunktionalität (Nachtigal, 1998)

Die Mehrheit der Systeme eines Organismus haben nur wenige Funktionen und Bestimmungen, jedoch immer mehr als eine.

5. Das Prinzip der kombinierten adaptierten Systeme

Um eine maximale Effektivität zu erreichen, arbeiten einige oder alle Systeme gleichzeitig zusammen. Die Systeme eines Organismus passen sich den äußeren Bedingungen der Umwelt an.

6. Das Prinzip der automatischen Regulierung

Alle Systeme eines Organismus arbeiten und regulieren sich automatisch und gleichzeitig.

7. Das Prinzip der Wärmeregulierung.

Ein Organismus erhitzt sich bei der Bewegung wie jedes andere mechanische System. Die Wärmeregulierung eines Organismus wird sowohl von inneren (chemischen) und thermodynamischen Prozessen als auch von mechanischen Parametern der Systeme bestimmt.

8. Das Prinzip der Wechselwirkung mit den physikalischen Feldern der äußeren Umwelt

Die Anpassungsmechanismen eines Organismus sind ein Ergebnis der Evolution. Sie wirken zusammen mit den physikalischen Feldern der Umwelt (dem thermodynamischen, dem hydrodynamischen, dem elektrodynamischen, dem magnetischen Feld u.a.).

9. Das Prinzip der Einheitlichkeit des motorischen und bewegungsantriebenden Komplexes (Muskeln und Flossen)

Motor und Bewegungsantrieb funktionieren in einem Organismus in Wechselbeziehung und als Ganzes zugleich. Sie tragen zur automatischen Regulierung und zur Verringerung des Widerstands bei den verschiedenen Bewegungen bei.

10. Das Prinzip der Einheit des gleichzeitigen Funktionierens aller Prinzipien

Die Mehrzahl der Prinzipien arbeiten bei hochentwickelten Organismen. Ein Organismus funktioniert optimal, wenn alle Prinzipien gleichzeitig funktionieren. Insgesamt bin ich auf eine Zahl von 34 solcher allgemeingültigen Prinzipien gekommen.

Gemäß der Hypothese der vorliegenden Forschungen werden wir zunächst die geometrischen Parameter des Körpers und seiner Teile (die Flossen) untersuchen. Die geometrischen Parameter sollen für einen mini-

malen hydrodynamischen Widerstand sorgen. Auf einem solchen Profil bleibt die Grenzschicht auf 80–90 % der Oberfläche laminar, d. h. ein solches Profil bietet einen minimalen Reibungswiderstand.

Die Form der Flossen hat eine optimale Geometrie, die den besten aerodynamischen Profilen entspricht. Die Flossen aller Wale und Delfine haben die Möglichkeit, die eigene Geometrie zu verändern, und die Schwanzflosse ändert die Flossenspannweite und die Form des Profils zyklisch im Laufe der Schwingung.

Um die Übereinstimmung der Anpassungen der Systeme des Organismus an die hydrodynamischen Gesetzmäßigkeiten der Körperumströmung zu beurteilen, muß man die realen Schwimmggeschwindigkeiten der Hydrobionten kennen. Man unterscheidet drei Typen von Schwimmggeschwindigkeiten: a) die Geschwindigkeit für langsames, zeitlich unbegrenztes Schwimmen; b) die Reisegeschwindigkeit beim Schwimmen, die die Tiere maximal 15–20 Minuten erbringen können; c) die forcierte Geschwindigkeit, die die Tiere nur für einige Sekunden erbringen können.

Die Bewegungsgeschwindigkeit hängt ab von der Zeit und von der Belastung sowie von der Größe der Muskeln, welche wiederum vom Umfang und von der Länge des Tieres abhängen. Die Mehrheit schnellschwimmender Hydrobionten stehen mit ihren Bewegungsgeschwindigkeiten den amerikanischen Unterwasserbooten nicht nach, einige übertreffen sogar die Relativgeschwindigkeiten der technischen Objekte.

Es stellt sich die Frage, warum Schnellhydrobionten sich mit solchen Geschwindigkeiten bewegen können. Die Laminarform erklärt das Phänomen nicht. Man vermutet, daß ein Komplex von Anpassungen an die Struktur des Organismus zur Erreichung der beobachteten Schwimmggeschwindigkeiten existiert. Es wurde die Hypothese aufgestellt, daß alles sich aus der Energetik der Tiere erklären läßt. Es wurden Messungen des Energieeinsatzes einiger Schnellhydrobionten vorgenommen. Je größer die Masse, desto höher die entwickelte Kapazität. Alle Messungen haben gezeigt, daß der Energieeinsatz schnellschwimmender Hydrobionten mit der Energie gut trainierter Sportler (z.B. Olympiasieger) vergleichbar ist. Mit der Form des Körpers und des Energieeinsatzes allein können also die hohen Schwimmggeschwindigkeiten nicht erklärt werden. Es muß bei Hydrobionten noch andere Anpassungen für schnelles Schwimmen geben.

Alle Hydrobionten bewegen sich nach der sinusoidalen Trajektorie und werden vom instationären Wasserstrom umströmt. Wie schon erwähnt, können drei Arten des Schwimmens unterschieden werden. Die experimentellen Untersuchungen der Bewegungskinetik, die in großem Umfang durchgeführt wurden, ist der wichtigste Teil der Hydrobio-

nik. Theorien, die die Bewegungsarten der Hydrobionten beschreiben und deren hydrodynamische Charakteristiken berechnen, wurden entwickelt. Die Messungen der Druckverteilung entlang des Körper haben gezeigt, daß beim aktiven Schwimmen eine Umverteilung des Druckes entlang des Körpers geschieht und dieser zur Laminarisierung der Grenzschicht beiträgt. Doch konnten die Berechnungen das Phänomen des schnellen Schwimmens der Hydrobionten nicht erklären.

Die Höhe der Geschwindigkeitsschwankungen bestimmt die Widerstandsreibung. Diese Daten machen sichtbar, daß die Widerstandsreibung des sich aktiv bewegenden Delphins wesentlich geringer ist als bei einem harten Körper. Um dieses Ergebnis erklären zu können, müssen die morphologische Struktur der Delphinhaut und seiner Systeme näher untersucht werden.

Die Hautwärtchen (Dermawärtchen) und die Hautrollen (Dermarollen) werden erst seit verhältnismäßig kurzer Zeit untersucht. Vor Millionen von Jahren war die Delphinhaut mit der des Menschen zu vergleichen. Das bedeutet, daß die spezifische Struktur der Haut unter dem Einfluß der Kraftspannungen des Flusses entstanden ist, mit dem Zweck die Widerstandsreibung zu vermindern.

Die Besonderheiten der Struktur der Systeme im Organismus des Delphins zeigen, daß bestimmte morphologische Anpassungen existieren, die vor allem auf die intensive Blutversorgung der Hautdecken in jeder Querschnittung gerichtet sind. Unabhängige (autonome) Anordnungen des Nervensystems in jeder Querschnittung der Haut zeugen von dem schnellen Regelungspotential des Blut- und Lymphsystems.

In diesem Zusammenhang ist die Messung der mechanischen Charakteristiken der Hautdecken von Interesse. Aufgrund der Analyse der Hautstruktur wurde das mechanische Modell des Elements der Hautdecke entwickelt. Für dieses Modell wird die Differentialgleichung der Bewegung gebildet. Aus Koeffizienten dieser Gleichung lassen sich die Hauptkriterien der Analogie bestimmen.

Es wurden Geräte und Methoden für die Bestimmung der mechanischen Charakteristiken der Hautdecken der Delphine entwickelt. Vor allen Dingen wurden mit Hilfe von speziell hergestellten Geräten die Messung der Hautelastizität entlang des Körpers vorgenommen.

Eine der wichtigsten Charakteristiken ist die Steifheit, die durch die Beziehung der Elastizität zur Dicke des gemessenen Materials bestimmt wird. Man kann erkennen, daß die Elastizität der Haut nur bei schnellem Schwimmen optimal ist.

Die Delphinhaut besitzt absorbierende Eigenschaften. Es zeigt sich, daß sich die Dämpfungskoeffizienten der Haut lebender Delphine von den Charakteristiken der Haut kranker oder eben erst gestorbener Delphine

sowie von Gummi- und Konstruktionsmaterialien wesentlich abheben. Der Koeffizient der Absorption lebender Delfine nähert sich 100%, entsprechend der Störungsenergie, der Schwankungsenergie des Blutdrucks oder der Übergangsgrenzschichten.

Es wurden auch andere mechanische Parameter der Hautdecken untersucht: die Schwingungsmasse, der Koeffizient der Hautspannung und die Phasengeschwindigkeit der Hautschwingungen. Alle diese Parameter wirken optimal auf die Reduzierung des Reibungswiderstands bei großen Schwimmgeschwindigkeiten.

Falls sich die mechanischen Charakteristiken der Hautdecken nur bei großen Schwimmgeschwindigkeiten optimal verhalten, so bedeutet dies, daß die Energie des Organismus für niedrige Schwimmgeschwindigkeiten ausreicht. Bei der Fortbewegung mit Reisegeschwindigkeit ist die Energie ungenügend, erst bei großen Schwimmgeschwindigkeiten tritt eine Verringerung des Reibungswiderstands ein. Es ist offensichtlich, daß solche Anpassungen beim Zusammenwirken aller Systeme des Organismus vor sich gehen.

Diese sind:

- Die Regulierung der Form des Körpers und der Flossen
- Die Regulierung der geometrischen Parameter der Hautdecken
- Die Anpassung der mechanischen Charakteristiken der Haut mit Hilfe der durch die Muskeln veränderten Hautspannung und die Schwingungen der elastischen Umgebung der Haut
- Die Regulierung der mechanischen Charakteristiken der Haut mit Hilfe des Blutkreislaufs und des Nervensystems
- Die spezifische Regulierung der Körpertemperatur der Haut
- Die Optimierung der mechanischen Parameter der Haut
- Die Regulierung der Vibrationen der Oberflächenhaut

Die Berechnungen haben gezeigt, daß sich auf Kosten von unbedeutenden Veränderungen des Durchmessers des Körpers und der Dicken der Hautdecke die mechanischen Charakteristiken der Haut und ihre stabilisierenden Eigenschaften der Grenzschicht wesentlich verändern können.

Der Delfin ist im Laufe der Bewegung wie ein elastischer Schwingungsbalken. Die Oberfläche der Haut kann man sich als konischen elastischen Überzug vorstellen. Durch die spezifische Struktur der Haut und Speckschichtunterhaut entsteht die Wärmeisolierung des Körpers von der Wasserumgebung. Infolge dessen geschieht beim Schwimmen mit großer Geschwindigkeit die Aufwärmung des Körpers und der Haut infolge der Schwingung der elastischen Systeme. Es ist bekannt, daß die Eigenschaften der elastischen Materialien wesentlich von der Temperatur abhängen. Auf diese Weise vollzieht sich die Anpassung der mecha-

nischen Charakteristiken der Haut an die äußeren hydrodynamischen Belastungen.

Die Regulierung der elastischen Eigenschaften der Haut vollzieht sich auch mit Hilfe des Blutdrucks und des Nervensystems. In der Epidermis besitzen die HaargefäÙe (Kappilaren) der Venen und Arterien untereinander direkte Verbindungen, was eine wirksame Durchströmung von venösem mit arteriellem Blut zuläÙt. Mit Hilfe des spezifischen Nervensystems kann diese Blutdurchströmung aktiv reguliert werden. Durch die Kontrolle der Hautmuskeln können die GefäÙe zusammengepreÙt oder vollständig geöffnet werden. Auf diese Weise kann der WärmefluÙ mit Hilfe des Blutsystems innerhalb des Körpers zirkulieren und andererseits können auf die äußeren Schichten der Haut die mechanischen Veränderung einwirken.

Die Messungen haben gezeigt, daÙ sich im ruhigen Zustand bei langsamem Schwimmen die Temperatur der Hautoberfläche von der Temperatur der Wasserumgebung deutlich unterscheidet ($0,5\text{--}0,7^\circ\text{C}$). An den Flossen bildet der Unterschied einige Grad Celsius. Bei solchen Temperaturunterschieden hat die thermische Grenzschicht keine Bedeutung für die Stabilisierung der Grenzschicht und Widerstandsreduzierung.

Bei hohen Schwimgeschwindigkeiten nimmt der Blutstrom zu und der partielle Blutdruck in den HaargefäÙen der Dermawärzchen steigt. Dabei nimmt einerseits die Elastizität der Haut zu, aber andererseits steigen als Folge der spezifischen Dermawärzchenform die dämpfenden Eigenschaften der Haut. Dadurch ergänzen sich die stabilisierenden Eigenschaften der Haut optimal. Der Bereich der optimalen Parameter der mechanischen Charakteristiken wird durch die passiven Analoga der Hautdecken bestimmt. Die Bedeutung der MeÙergebnisse der mechanischen Charakteristiken der Hautdecken können in einem vorläufigen Ansatz für die Bestimmung der entsprechenden Charakteristiken der künstlichen elastischen Decken des Etalon herangezogen werden. Die Messungen der Vibrationen der Hautdecken der Delphine wurden bei verschiedenen Schwimgeschwindigkeiten durchgeführt. Die mechanischen Charakteristiken künstlicher Gummioberflächen haben eine genaue Übereinstimmung mit den aufgeführten Daten gezeigt. Außerdem zeugt die aktive Schwingung der Oberflächen vom Resonanzmechanismus des Zusammenwirkens mit den Grenzschichtstörungsbewegungen.

Die Koeffizienten des hydrodynamischen Widerstands der Delphine bei der stationären Bewegung sind größer als die, welche man bei schwimmenden Delphinen für die Schwingungsbewegungen des ganzen Körpers erhält. Der Delphinwiderstand ist um so geringer je größer die Beschleunigung und je größer die Körperspannung ist. In diesem Fall reißen sich in die Arbeit alle Systeme des Organismus ein.

Die aufgeführten Ergebnisse hydrobionischer Forschungen lassen die Behauptung zu, daß die schnellschwimmenden Meerestiere einen Komplex von Anpassungen zur Widerstandsreduzierung haben. Die Reihe der Mittel der Anpassungen, die entdeckt wurden, sind folgende:

- Die Anpassungen funktionieren gesondert und / oder gleichzeitig je nach der Art des Schwimmens.
- Die Anpassungen zielen darauf, optimale Ergebnisse zu erreichen, besonders für die Vergrößerung der Effektivität des Wirkungsgrads des Bewegungsantriebs als auch der Widerstandsreduzierung.
- Die Anpassungen wirken als aktive Regulierung auf das System der Rückkopplung ein.
- Die Anpassungen wurden durch Modelle erprobt.

In der Natur funktionieren alle Anpassungen gleichzeitig und gemeinsam. Doch kann man für technische Anlagen die Optimierung gesonderter Systeme durchführen. Nach einem ähnlichen Schema wurden auch die Besonderheiten der Körper- und Flossenform, des motorischen Antriebskomplexes, des Systems der Schleimabgabe, der Kinematikbewegung, der Gesetzmäßigkeit bei unstationären Bewegungen und der Schwingung des Körpers und der Resonanzmechanismen ausführlich untersucht.