



*Univerza v Ljubljani
fakulteta za matematiko in fiziko
Oddalek za fiziko*

Turbulentno življenje delfinov

Jože Pernar

Mentor: prof. dr. Rudolf Podgornik

13. oktober 2007

Kazalo

0.1	Povzetek in zahvale	2
0.2	Uvod	3
0.3	Laminarno in turbulentno gibanje	3
0.4	Delfini- kratek opis	4
0.5	Zgodovina raziskav	5
0.6	Grayev paradoks	5
0.7	Fizika skokov delfinov	6
0.7.1	Faze gibanja delfina	6
0.7.2	Energija in fizikalni pogled na gibanje v treh fazah	7
0.7.3	Diagram hitrosti gibanja	14
0.8	Spinanje delfinov	15
0.9	Enigma hitrosti delfinov	16
0.10	Premagovanje turbulence z luščenjem kože	17
0.11	Zaključek	18
0.12	P.S.:	19

”Delfini običajno plavajo pred ladjo. Mogoče včasih ob strani vzdolž trupa plovila. Nikoli pa ne plavajo v brazdi ladijskega toka. Za razliko od njih morski psi sledijo čezoceanske ladje zaradi njenih odpadkov. Delfini pridejo samo zaradi igre. Včasih skačejo iz vode, se poženejo preko lomljenih valov in se nikoli ne potapljajo pod ladjo. Nikoli niso pohlepni in nikdar ne prosjačijo. So kot odposlanci boga morij Neptuna in kot spremljevalci ladje, da pride varno v pristanišče.”

E.J.Slijper 1979

0.1 Povzetek in zahvale

Seminarska naloga skuša s svojim gradivom nakazati nekaj različnih fizikalnih lastnosti gibanja delfinov. Kako je mogoče, da delfini plavajo tako hitro? To vprašanje visi v oblačkih misli nekaterih znanstvenikov še danes. Poleg vsega pa dajejo občutek, kot da to opravljajo s popolno lahkoto. Vsaj zdi se tako. Še danes ni popolnoma dognano, kako je možna tako velika plavalna hitrost, okretnost, rotacije in visoki skoki delfinov. V Sloveniji je to dokaj zapostavljeno vprašanje. Kljub mojim velikim naporom, da bi našel nekoga, ki se vsaj teoretično ukvarja z delfini, mi to ni uspelo. Za kakšno resno raziskovalno delo ali poizkuse seveda pri nas niti ni pogojev. Zato je bil odziv izraelskega strokovnjaka Daniela Weihsa iz Faculty of Aerospace Engineering, Haifa, na moj poziv k sodelovanju več kot dobrodošel. Prof. Weihs je sodeloval v kar nekaj raziskavah z delfini v aeronavtične namene. Tako je osrednji računski del naloge povzet iz tega sodelovanja.

Za svoj komentar in odgovor na moje vprašanje se zahvaljujem tudi g.Tilnu Genovu iz društva za raziskovanje in zascito morskih sesalcev Morigenos. Že ob samem zaključevanju naloge sem prejel tudi gradivo prof.dr.Yoshimichi Hagiware iz Kyoto Instituta za tehnologijo. Tako je zadnji del namenjen delu japonskih strokovnjakov in njihovim simulacijskim pristopom.

Za napotke in dano možnost se lepo zahvaljujem predvsem mentorju prof.dr. Rudolfu Podgorniku.

0.2 Uvod

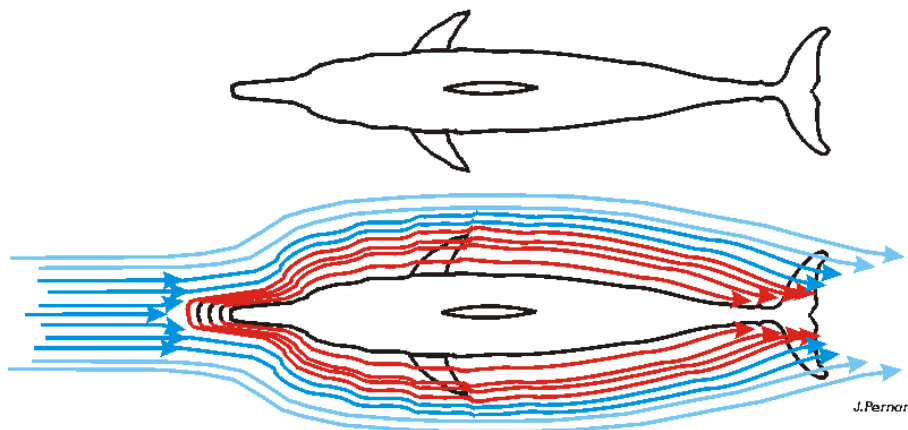
Delfini lahko dosegajo in vzdržujejo po več ur hitrosti plavanja tudi nad 10 m/s. Nekatera merjenja so pokazala tudi hitrosti do 20 m/s. Standardni izračuni inženirjev in strokovnjakov predvidevajo in ugotavljajo, da bi morale delfinove mišice proizvajati sedem krat več moči za doseganje tako velikih hitrosti, kot je njihova predvidena morfološka meja. Mogoče ne razumemo specifičnosti delfinovih mišic? Biologi-morfologi te hipoteze zagotovo ne želijo prevzeti. Anatomija, histologija in citologija je na nivoju, ki takšna vprašanja odločno zavrača. Torej ne preostane drugega, kot, da se loti problema fizika.

Alternativne razlage govore o tem, da delfinom uspe zmanjševati drsno trenje njihove kože skozi vodo bolj, kot kažejo izkušnje običajnih teles v vodi. Laminarni tok bi bil ena od možnih rešitev. V kolikor delfinom uspe ustvariti pogoje za laminarni tok, je večna uganka hitrosti delfinov blizu izhoda iz misterioznega tunela. Da bi laminarni tok razumeli ga je treba spoznati v okolju ostalih tokov in vrst gibanja tekočine.

0.3 Laminarno in turbulentno gibanje

Telo v vodi se obravnava hidrodinamično na več načinov. Telo se lahko premika v mirujoči vodi. Telo lahko miruje in je voda v toku. Pri delfinih je oboje dinamično. Za nas je bolj pomembno, da privzamemo obtokanje telesa zaradi njegovega premika, čeprav so v morju prisotni tudi tokovi vode. Glede na to kako potekajo tokovnice druga ob drugi ločimo laminarno in turbulentno gibanje tekočin ob telesu. Tokovnice se včasih lepo vijejo druga ob drugi in se med gibanjem tekočine ne mešajo ali kako drugače prepletajo (slika 1). Takšno gibanje tekočine imenujemo laminarno gibanje. Plasti tekočine se v tem primeru ne mešajo. Če eno plast tekočine obarvamo, se barva med gibanjem ne prenaša na sosednje plasti. Vse kaže tako, da delfinom uspeva zagotoviti to vrsto gibanja vode ob njihovem telesu.

V splošnem je gibanje tekočine bolj nemirno, kot je značilno za laminarno. Tekočinske plasti se prepletajo in mešajo, nastajajo vrtinci, ki tekočino močno mešajo. Takšno gibanje imenujemo turbulentno gibanje, to je gibanje v vrtincih. Tokovnice se prepletajo in tekočina se med gibanjem meša. Ali je gibanje tekočine laminarno ali turbulentno, je odvisno od hitrosti gibanja tekočine ali telesa in od notranjih sil, ki zavirajo relativno gibanje sosednjih tekočinskih plasti. Pri majhnih hitrostih je gibanje tekočine običajno laminarno, saj se počasi gibajoče se plasti ne morejo veliko mešati. Hitro gibanje tekočine pa je običajno turbulentno. Močne notranje sile med sosednjimi deli tekočine nasprotujejo relativnemu premikanju sosednjih plasti, kar pomeni, da nasprotujejo mešanju tekočine. Gibanje tekočine, pri katerih so notranje sile velike, je zato laminarno. In tu zopet zaplavamo v nejasne



Slika 1: Plastnice - tokovne lamele laminarnega gibanja.

vode, kajti delfini dosegajo laminarno gibanje tekočine ob telesu ravno pri velikih hitrostih, kar ni tipično za razumevanje samega laminarnega toka. Očitno razpolagajo z manevrom ali mehanizmom, katerega jim to zagotavlja. Nekaj časa je bila zanimiva teza, da njihove kožne mišice premorejo nekakšno produciranje grebenov ali raz, katere zagotavljajo pogoj za laminarni tok. Menim, da bi bilo to zelo težko dokazati, kajti omenjena struktura bi zelo verjetno ustvarila ravno turbulenco in ne laminarni tok.

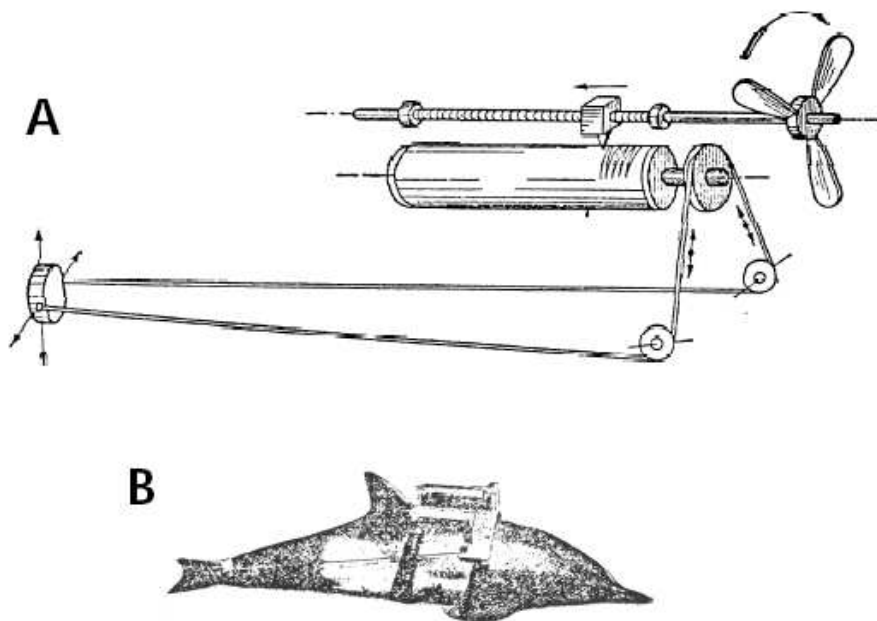
0.4 Delfini- kratek opis

Ta prijetni sesalec skrivnostnega nasmeška s svojimi 32 vrstami spada v red kitov (Cetacea). V grščini pomeni *cetus* morska pošast. Ne morem se znebiti občutka, da si je delfin prislužil to ime in red predvsem po dejstvu, da je sesalec in ne riba. Njegova oblika, zgradba in predvsem karakter nikakor ne ustrežajo imenu pošasti.

Imajo presenetljivo gladka in hidrodinamična telesa, s hrbtno plavutjo, ki je navadno zelo izrazita. V nasprotju z drugimi sesalci nimajo dlak, niti dlačnih mešičkov. Te majhne jamice v koži, iz katerih izraščajo dlake bi jim nedvomno pokvarile plavalne hitrosti, na katere sem se osredotočil v prisotni nalogi. Izredno močne obrepne mišice omogočajo repu, da udarja navzgor in navzdol. Praktično se poganja z repom, kateri pri vsakem sunku odrine vodo za sabo, telo pa požene naprej. Ostale tri telesne plavuti služijo krmarjenju, skokom in spinanju. Tudi zunanji ušes nima, medtem ko so spolni organi pokriti s kožno gubo. Vse je prilagojeno hitremu plavanju in skoraj idealnemu hidrodinamičnemu telesu. Ostalih anatomskih in morfoloških podatkov ne omenjam, ker ne vplivajo poglavitno na gibalne, predvsem pa plavalne lastnosti.

0.5 Zgodovina raziskav

Kakorkoli je celoten živalski svet izredno raznolik in zanimiv, so delfini že od nekdanj nekaj posebnega, kar je človeka vedno navdihovalo z velikim zanimanjem. Zgodnja poročila o plavanju delfinov prihajajo od Aristotela (*Historia Animalium*), ki je ugotavljal, da so delfini najhitrejši živali. Opis plavalnega mehanizma je podal Borelli (*De Motu Animalium*, 1680), ko je zabeležil gibanje gor in dol pri nekaterih kitih. Opazovanja kitov in njihovih plavalnih sposobnosti je bilo vse do let okoli 1800 nezanesljivo. V letih po 1859, ko je Charles Darwin objavil svojo knjigo *The Origin of the Species*, se je dotaknil morfologije in plavalnega gibanja z istočnico mehanizma evolucijskega napredka. Kasneje se je kar nekaj biologov ukvarjalo s tovrstnim opazovanjem in raziskovanjem (Flower, 1883; Ryder, 1885; Kuenthal, 1891; Pettigrew, 1893; Beddard, 1900; Kellogg, 1928). Opazovanja kitov so pokazala, da se večina pogonske moči skriva v repni plavuti.



Slika 2: Ene prvih raziskav merjenja hitrosti.

0.6 Grayev paradoks

Angleški zoolog Sir James Gray je v letih 1925 do 1954 skušal dognati čim več povezav med anatomijo živalskih teles in njihovo funkcionalnostjo. Svoja dognanja je objavil v *Journal of Experimental Biology*. Med ostalimi se je lotil tudi delfinov.

Leta 1936 je Gray presenetil z dognanjem o problemu, katerega pred njim ni natančno opredelil še nihče. Osupnil je tudi znanstvenike. Že stoletja prej je bilo dobro znana a nepojasnjena izjemna hitrost delfinov v vodi. Vprašanje na katerega se je Gray osredotočil je bilo, kako je sploh možno doseči tako velike hitrosti. Z okrnjeno oceno fiziološke moči delfinov je bil Gray zmožen priti do zaključkov, da je ta moč matematično nezadostna za doseganje hitrosti delfinov, katero so razvijali mornarji pri opazovanju. To pomeni, da je pričakovana mišična moč delfinov premajhna glede na to kako visoke hitrosti lahko dosegaajo pri svojem plavanju. Problem je ostal za tisto obdobje in način dela pretežak. Nov zagon tej enigmi je dal 25 let kasneje Kramer, ko je domneval in postavil hipotezo o koži delfinov, katera onemogoči obtekanje vode po sami površini kože. S tem bi bila preprečena turbulenca. To pa bi dramatično zmanjšalo upor in razrešilo Grayev paradoks. Kakšnih 30 let po predlagani Kramerjevi hipotezi se je pojavilo nekaj ustanov z končnimi rezultati osnovnih principov omenjenega problema. Kakorkoli že, je bila tako potrjena pravilnost Kramerjeve hipoteze. Grayev paradoks pa vendarle ni bil rešen v popolnosti. Z glavnimi izvedbami delfinov na posameznih fizioloških nivojih človeka je Gray izdelal paradoks bolj veličasten, kot v resnici je. O tem se je opredelil Bechert leta 2000. Na ta način dobimo, da se produkcijska moč delfinov nekoliko približa pričakovani hitrosti. Se pa še vedno ne ujema. Delfini namreč plavajo bolj normalno, kot je prikazal Gray s svojimi izračuni. Dokončna razlaga in ujemanje razmerja mišične moči in hitrosti premikanja delfinov ostane še brez natančne rešitve.

0.7 Fizika skokov delfinov

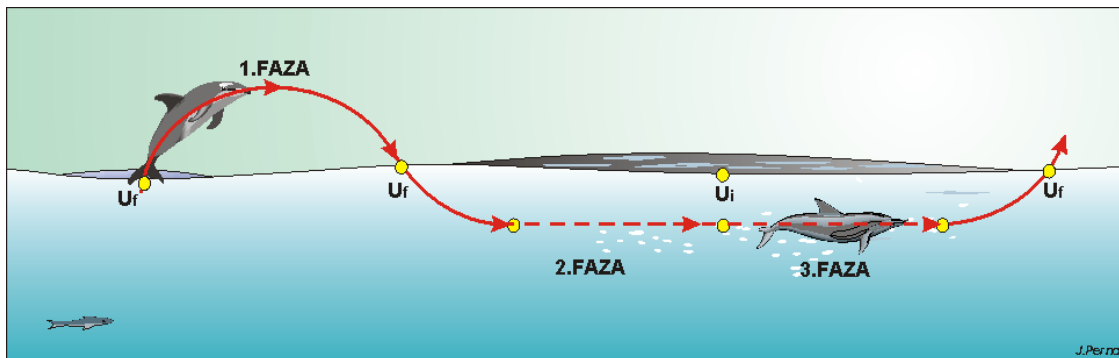
Plavanje delfinov ni enakomerno niti ni samo plavanje. Svoje zajetne razdalje delfini premagujejo s kombinacijo skokov in plavanja. Zanimiva je vzporednica z kenguruji, ki tudi ne tečejo ampak skačejo. In tudi njihovi skoki niso fizikalno dognani. Delfinovi skoki se končujejo z delom gibanja, ko samo drsijo skozi vodo brez dodane energije poganjanja. Takšna oblika gibanja se razvija v cikličnih ponovitvah, tako, da lahko generalno razdelimo in sestavimo njihovo gibanje v tri faze.

0.7.1 Faze gibanja delfina

V skladu z načrtovanim modelom, spoznajmo tri različne faze:

1. Faza skoka - balistična tirnica skozi zrak preko nivoja vode.
2. Faza drsenja - v času, ko ni plavalnega gibanja in zavzete lokacije, začetek prodiranja gladine vode.
3. Faza pospeševanja - opisuje sunkovito plavalno gibanje na konstantni globini, razen zadnjega trenutka ob vzpenjanju in izplavanje na površino, ko

je dosežen balistični kot.



Slika 3: Gibanje delfinov v treh fazah.

0.7.2 Energija in fizikalni pogled na gibanje v treh fazah

Kot je bilo omenjeno v uvodu so te tri faze pravzaprav kombinacije dveh tipov vedenjskih analiz posebno v prejšnjem izvajanju. Najprej definiramo potrebno energijo za kontinuirano hitrost plavanja na vodni površini. To je napotek za porabljeno energijo, katero bomo kasneje primerjali z gibanjem v treh fazah. Energija na razdalji L , medtem ko je plavanje na površini,

$$E = TL \quad (1)$$

Pri čemer je enakomerna hitrost enaka DL , kot je sunek enak uporu pri enakomerni hitrosti. Upor je lahko zapisan kot

$$D_s = \frac{1}{2} \rho_w V^{2/3} C_{DS} U^2 \quad (2)$$

Koeficient upora za aktivno nihajoče plavanje, ko je telo blizu površine

$$C_{DS} = C_D \beta_\gamma \quad (3)$$

Kjer je β razmerje upora med izvajanjem gibanj plavanja in uporom iztegnjenega telesa. β je bil izračunan v vrednosti nad 5 za vztrajno plavanje Bottlenoseovih delfinov (Skrovan, 1999). "gama" je razmerje upora plavanja blizu vodne površine, sorazmeren z plavanjem na globini. To razmerje lahko doseže vrednost 5 v odvisnosti od globine (Hertel, 1966, Lang and Daybell, 1963). Te velike porasti upora so posledica treh faz gibanja.

Naslednji del pripada analizi in raziskavi dela skoka treh faz gibanja. Pri tem delu je dobro, če upoštevamo pri meritvah pogoje okolice. Pri izračunu

stvar poenostavimo. Upor v zraku je iz (2)

$$D_a = \frac{1}{2} \rho_a V^{2/3} C_D U^2 \quad (4)$$

enakovreden upor v vodi, ko plava dan od (2). Z deljenjem dobimo

$$\frac{D_a}{D_s} = \frac{\rho_a}{\rho_w \beta \gamma} \quad (5)$$

za standardne razmere $\rho_a/\rho_w \approx 1/800$; $\beta \approx 3$; $\gamma \approx 4.5$ in je $D_a/D_s \approx 1/10800$. Tako iz (1), določena količina energije iz viskoznega upora v zraku izgubi manj kot 0.01 odstotka v primerjavi z plavanjem blizu površja. Ta vrsta izgube je v globoki vodi okoli 0.1 odstotka (kjer je $\beta_\gamma = 1$).

Izvedbe skokov na osnovi balističnega meta je možno izračunati s pomočjo



Slika 4: Faza skoka. Lepo vidna voda, ki jo telo povleče za sabo.

zakonov mehanike. Vodoravno razdaljo prečkanja preko točke osi, kjer je center mase živali zunaj vode lahko izračunamo po Au in Weihsu (1980)

$$l_j = \frac{U^2}{g} \sin 2\alpha \quad (6)$$

in čas med skokom izven vode

$$t_j = \frac{2U}{g} \sin \alpha \quad (7)$$

posebna energija potrebna za skok J je lahko ocenjena na osnovi dosežene višine

$$H_j = \frac{U^2}{2g} \sin^2 \alpha \quad (8)$$

kot

$$J = WH_j(l + m) \quad (9)$$

kjer je dodan koeficient mase m približno ≈ 0.2 (Webb, 1975) in 0.2β za sunkovito plavanje delfina. Energija J kakorkoli ni energija izgubljena med skokom. Ko se telo premika pri enaki hitrosti in zapušča ter se vrača na vodno površino se energija telesa ohranja. Tako imamo izgube energije le pri izhodu iz vode in atraktivnem vstopu nazaj ob predpostavki zanemarjanja viskoznega upora v zraku. Energija pljuska je lahko grobo ocenjena od dodatne mase živali, ki je definirana kot vrednost premikanja vode z živaljo pri enaki hitrosti. Tako, kot v hipu žival zapusti vodo se pri izvedbi plavalnega gibanja in vračanju v podvodni plavalni položaj energija prenese. Pri izhajanju pridobljena voda se izgubi. Del dodane energije je vložen v pospeševanja pri vstopanju vodo. Ta dva prispevka lahko zapišemo kot

$$E_j = \left(\frac{mMU^2}{2}\right)_{izhod} + \left(\frac{mMU^2}{2}\right)_{vhod} = \frac{\beta mMU^2}{2} + \frac{mMU^2}{2} \quad (10)$$

tako je

$$E_j = \frac{1 + \beta}{2} mMU^2$$

Au in Weihs sta pri svojih izračunih uporabila različne manj točne ocene od $E_j = MU^2(1 + m)/4$. Azuma (1992) je samo določil energijo pljuska. Sledi študija podvodne plavalne faze. Diferencialna enačba opiše zmanjšanje gibanja med podvodnim delom plavanja,

$$M(1 + m) \frac{dU}{dt} + \frac{1}{2} \rho_w V^{2/3} \gamma C_D U^2 = 0 \quad (11)$$

kjer je C_D koeficient upora (3) podvodnega gibanja globlje potopljene živali. Tu privzamemo ponovni vhod pod kotom α in žival spremeni vodoravno gibanje z prodiranjem skozi površino vode. Tako lahko zapišemo

$$\frac{1}{2} \rho_w V^{2/3} \gamma C_D \equiv C \quad \text{in} \quad M(1 + m) \equiv M_l \quad (12)$$

enačbo (11) lahko sedaj zapišemo

$$M_l \frac{dU}{dt} + CU^2 = 0 \quad (13)$$

Mejni pogoji za diferencialno enačbo so

$$U = U_f, t = 0 \quad (14)$$

in

$$U = U_i, t = t_c \quad (15)$$

Kjer je U_f hitrost prodiranja in U_i nižja hitrost dosežena po času t_c . Rešitev te enačbe sledi

$$l_c = \frac{M_l}{C} \ln\left(\frac{U_f}{U_i}\right) \quad (16)$$

za dolžino podvodnega dela in

$$t_c = \frac{M_l}{C} \left(\frac{1}{U_i} - \frac{1}{U_f} \right) \quad (17)$$

za čas porabljen v tej fazi. Pravzaprav je samo en mejni pogoj, (14), potreben za rešitev. Kot (13) je prvi red običajne diferencialne enačbe. Enačba (15) se nato uporabi za specifične vrednosti.

Pri zmanjševanju vrednosti hitrosti U_i , živali pričnejo z enakomernim pospeševanjem in nato največji sunek T_e .

Diferencialna enačba za naslednjo fazo eksplozivnega plavanja

$$T_e = M_l \frac{dU}{dt} + \beta C U^2 \quad (18)$$

Začetni pogoj tu je

$$U = U_i, \quad \text{pri} \quad t = 0 \quad (19)$$

S substitucijo

$$U = U_f, \quad \text{pri} \quad t = t_b \quad (20)$$

določimo vrednost dolžine časa t_b porabljenega pri pospeševanju vstevši strmo dviganje in zupušcanje vode pri hitrosti U_f . To vzpenjanje - vzplavanje na površino ima specifično hitrost, kot faza balističnega skoka ima enako ponovno hitrost plavanja na površino. Razdalja med prečkanjem

plavalne faze je dosežena iz (20), kot

$$l_b = \frac{M_l}{\beta C} \ln \left[\cosh(rt_b) + \frac{U_i}{U_e} \sinh(rt_b) \right] \quad (21)$$

kjer

$$r = \frac{\beta C U_e}{M_l} \quad (22)$$

in U_e je referenca hitrosti dosežena iz

$$T_e = \beta C U_e^2 \quad (23)$$

U_e je največja možna hitrost dosežena iz (18), kot hitrost, kjer ni nadaljnega pospeška lahko tako izpeljana v prvem izrazu izgine. U_e je lahko izračunana iz (23), če je največji sunek T_e znan. U_e je primerna zveza hitrosti takšna kot je z definicijo večjo kot obe U_f in U_l . Tako z deljenjem z U_e brezdimenzijske vrednosti so primerne meje dosežena med 0 in 1. Z uporabo U_e izključno kot normalizacijskega faktorja ta ni enak potrebnemu znanemu T_e .

Zahtevani čas za pospešek od U_i do U_f je lahko zapisan kot

$$t_b = \frac{1}{r} \tan^{-1} \left(\frac{\bar{U}_f - \bar{U}_i}{1 - \bar{U}_f \bar{U}_i} \right) \quad (24)$$

Sedaj imamo določene vse izraze za računanje porabljene energije skozi vse tri faze plavanja. Lahko jih med sabo primerjamo skozi enakomerno plavanje. Sledi vpeljava dveh količin \bar{U}_i in \bar{U}_f . Z opazovanji se je ugotovilo, da so plavalne dolžine v povprečju dvakrat daljše od dolžine skokov. Vzemimo tako razmerje plavanja in skokov k kot izmerljiva količina. Tako

$$l_c + l_b = k l_j \quad (25)$$

in substitucija enačb (6), (16) in (21) v (25), po preoblikovanju

$$\bar{U}_f^2 = \frac{1}{k} \frac{M_l g}{\beta C U_e^2} \left\{ \ln[\cosh(rt_b) + \bar{U}_i \sinh(rt_b)] + \beta \ln\left(\frac{\bar{U}_f}{\bar{U}_i}\right) \right\} \quad (26)$$

za prvi člen velja $M_l g = W(1+m)$ in tudi $\beta C U_e^2 = T_e$. Tako lahko zapišemo

$$\bar{U}_f^2 = \frac{1+m}{k} \frac{W}{T_e} \left\{ \ln[\cosh(rt_b) + \bar{U}_i \sinh(rt_b)] + \beta \ln\left(\frac{\bar{U}_f}{\bar{U}_i}\right) \right\} \quad (27)$$

s substitucijo (24) v (27), vidimo novo obliko enačbe za energijo, kjer je

$m \approx 0.2$ in $k \approx 2$. Z vpoklicom t_e dobimo referenčni sunek, katerega vzamemo za največjo dosegljivo vrednost. Direktno merjenje sunka za lokomotivno gibanje delfinov ni bilo popolno primerljivo statičnim meritvam od zgoraj do 1.5 krat telesne teže kjer je bil merjen in okoli 0.6 krat telesne teže ob najvišji porabi kisika in najnižji produkciji mlečne kisline mišičnega tkiva. Nekateri rezultati razmerja W/T_e so prikazani v sliki tabele(5). Tako

Vrsta delfina	Teža (N)	Sunek (N)	W/T_e
<i>Pseudorca crassidens</i>	3600	2876	1,25
<i>Tursiops truncatus</i>	2578	1612	1,60
<i>Tursiops truncatus</i>	1890	1233	1,53

Slika 5: Tabela razmerij W/T_e .

lahko uveljavimo \bar{U}_i za vsako dano \bar{U}_f iz enačbe (27), ko so m , k in W/T_e znani, kot produkti rt_b zaznanih v enačbi (27) in funkcije od \bar{U}_i in \bar{U}_f so samo v enačbi (24).

Celotna dolžina enega cikla skozi vse tri faze je tako

$$L = l_j + l_c + l_b \quad (28)$$

Ali pa iz (16) in (21) upoštevajoč dejstvo, da je hitrost med trajanjem skoka U_f in z uporabo brezdimenzijskih vrednosti za \bar{U}_i in \bar{U}_f

$$L = \frac{U_e^2}{g} \bar{U}_f^2 \sin 2\alpha + \frac{M_l}{C} \left\{ \frac{1}{\beta} \ln[\cosh(rt_b) + \bar{U}_i \sinh(rt_b)] + \ln\left(\frac{\bar{U}_f}{\bar{U}_i}\right) \right\} \quad (29)$$

to enačbo nadalje poenostavimo

$$L = \frac{M_l}{\beta C} \left\{ \frac{T_e \sin 2\alpha}{W} \bar{U}_f^2 + \ln[\cosh(rt_b) + \bar{U}_i \sinh(rt_b)] + \beta \ln\left(\frac{\bar{U}_f}{\bar{U}_i}\right) \right\} \quad (30)$$

Pogoj celotne energije za en cikel vseh treh faz je $E_j + E_b$. Del podvodnega drsenja med točkama U_f in U_i porabe energije ni.

$$E_j + E_b = \frac{1 + \beta}{2} m \gamma \bar{U}_f^2 \bar{U}_e^2 + \beta \gamma C U_e^2 l_b \quad (31)$$

Energija stalnega plavanja blizu gladine s povprečno hitrostjo je iz enačb (1)-(3)

$$E_s = \beta \gamma C U_{av}^2 L \quad (32)$$

kjer je U_{av} povprečna začetna hitrost trajajoča skozi celoten cikel. Iz (30),

(31) in (32) razmerja energije za tri faze je potrebno primerjati k kontinuiranim plavanjem po enoti prečne razdalje. Razdalje so enake

$$\begin{aligned}
R = \frac{E_j + E_b}{E_s} &= \left\{ \frac{1 + \beta}{2} \frac{m}{1 + m} \bar{U}_f^2 + \ln[\cosh(rt_b) + \bar{U}_i \sinh(rt_b)] \right\} \\
&\div \left(\left\{ \frac{T_e}{W} \frac{1}{1 + m} \bar{U}_f^2 \sin 2\alpha + \ln[\cosh(rt_b) + \bar{U}_i \sinh(rt_b)] \right. \right. \\
&\quad \left. \left. + \beta \ln \left(\frac{\bar{U}_f}{\bar{U}_i} \right) \right\} \bar{U}_{av}^2 \right) \quad (33)
\end{aligned}$$

Edina neznana količina v (33) je \bar{U}_{av} normalizirano povprečje hitrosti. To lahko izračunamo iz

$$U_{av} = \frac{l_j + l_b + l_c}{t_j + t_b + t_c} = \frac{L}{t_j + t_b + t_c} \quad (34)$$

vse kar smo pridobili prej. Iz enačbe (7), (17), (24) in (30) po določeni ureditvi

$$\begin{aligned}
\bar{U}_{av} = \frac{U_{av}}{U_e} &= \left\{ \beta \ln \left(\frac{\bar{U}_f}{\bar{U}_i} \right) + \ln[\cosh(rt_b) + \bar{U}_i \sinh(rt_b)] \right. \\
&\quad \left. + \frac{T_e}{W} \frac{1}{1 + m} \bar{U}_f^2 \sin 2\alpha \right\} \\
&\div \left[\frac{T_e}{W} \frac{2}{1 + m} \bar{U}_f \sin \alpha + \beta \left(\frac{1}{\bar{U}_i} - \frac{1}{\bar{U}_f} \right) + \tanh^{-1} \left(\frac{\bar{U}_f - \bar{U}_i}{1 - \bar{U}_f \bar{U}_i} \right) \right] \quad (35)
\end{aligned}$$

Sedaj imamo vse potrebne izraze enačb za parametrično ugotavljanje in raziskave, s katerimi lahko dokažemo vrsto hitrosti treh faz. Zanimiva je še primerjava razmerja potrebne energije R z ekvivalentom razmerja primerjajoč polnim-maksimalnim plavanjem in zgolj drsenjem skozi vodo. To razmerje (enačba 18, Weihs 1974) je v sedanjem zapisu in ponovnem upoštevanju obeh oblik prihajanja na površino (tako γ odstranimo)

$$R_2 = U_e^2 \frac{t_b(t_b + t_e)}{(l_b + l_e)^2} \quad (36)$$

Primerjava R in R_2 bo pokazala zaporedja hitrosti za katere je vsak od teh dveh koristen, kot funkcija od β . Kombinacija krivulj zahteva nadaljni

korak, kot referenčna hitrost U_e vzeta iz (23) je funkcija od β in W/T_e iz (23) in (12)

$$U_e^2 = \frac{T_e}{\beta C} = \frac{T_e}{W} \frac{1}{\beta \gamma} \frac{2W}{\rho_w V^{2/3} C_D} \quad (37)$$

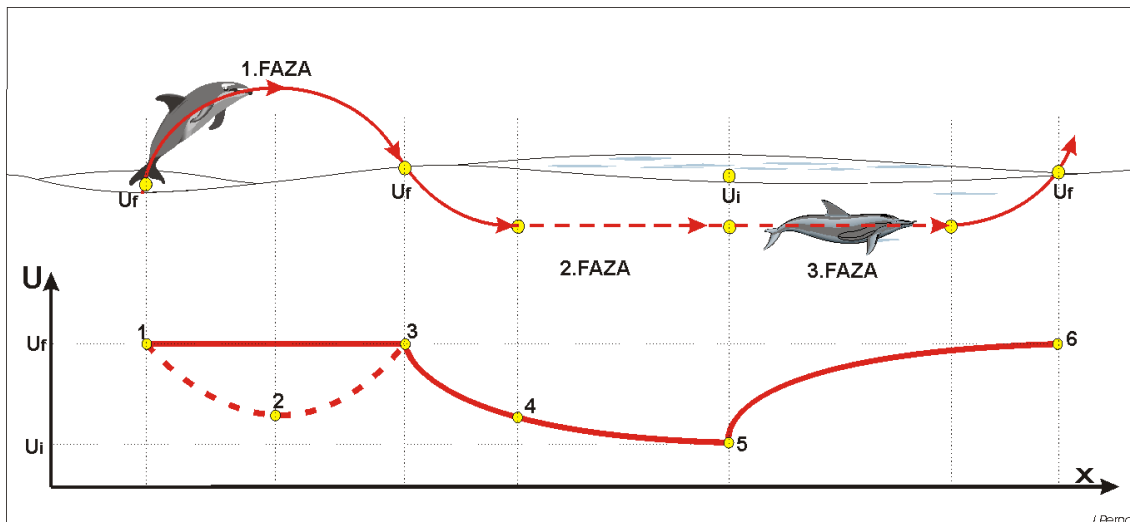
Za združitev krivulj na enojno absciso definiramo nominalno maksimalno hitrost za $W/T_e = 1$, $\beta = 1$ in $\gamma = 4.5$. Tako

$$U_n^2 = \frac{2W}{4.5 \rho_w V^{2/3} C_D}; \quad \left(U_n^2 = U_e^2 \beta \frac{W}{T_e} \right) \quad (38)$$

sedaj lahko uporabimo vezavo abscise U_{av}/U_n pridobljeno na podoben način za U_{av} , (35)

$$\bar{U}_n \equiv \frac{U_{av}}{U_n} = \frac{U_{av}}{U_e} \frac{U_e}{U_n} = \frac{U_{av}}{U_e} \sqrt{\frac{T_e}{W} \frac{1}{\beta}} \quad (39)$$

0.7.3 Diagram hitrosti gibanja



Slika 6: Diagram neenakomernega gibanja.

Že v poglavju zgodovine opazovanja sem zapisal, da so dokaj zgodaj opredelili delfinovo gibanje, kot sestavljeno gibanje. Faze teh gibanj se razlikujejo po hitrosti. V fazi skoka naj bi bila hitrost pri izhodu iz vode na točki 1 (slika 6) enaka ponovnemu vходу v vodo na točki 3. Skozi balistični skok doseže telo v točki 2 najmanjšo hitrost. Ta za celotno raziskovanje nima velikega pomena, saj ne vpliva na končne rezultate. Ko telo zdrsne v

vodo z vhodno hitrostjo U_f se mu hitrost neenakomerno zmanjšuje vse do točke 4. V tem delu ni pogonskega gibanja, tako zaradi upora telo izgublja na hitrosti in doseže najnižjo točko hitrosti (5). Sunkovit zamah z repom in najprej vodoravno pospešeno gibanje povzroči največji pospešek, nakar z večanjem hitrosti zopet pride do velikosti U_f , kjer je hitrost v točki 6 enaka začetni v točki 1.

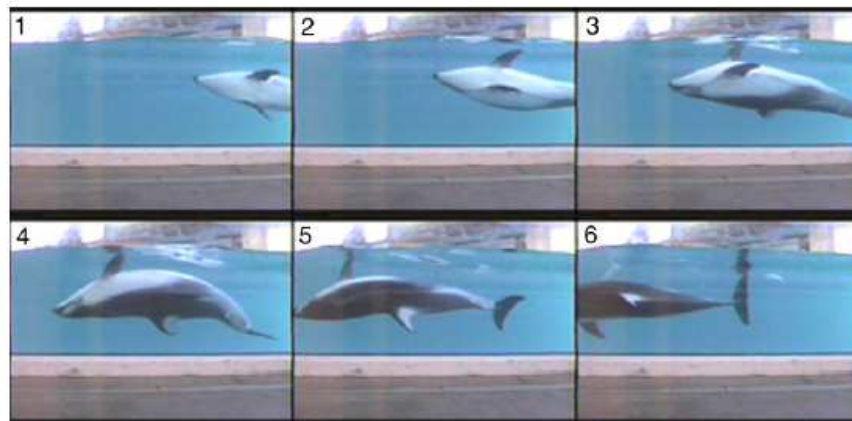
0.8 Spinanje delfinov

Poleg plavanja v treh fazah razpolaga delfin še z vrsto zanimivih oblik gibanja.

Svojo veliko moč repnega dela mišic raskazuje delfin z vzratnim pokončnim plavanjem. Za vodnih živalski svet dokaj nenavadno gibanje, katerega ne srečamo pri nobeni drugi živali.

Zelo pestra paleta različnih skakov in salt ter lupingov je v neki meri pristojna tudi pri kitih.

Fizikalno razlago pa si nedvomno zaslužijo obrati okoli vzdolžne osi. Izraziti mojstri te veščine so delfini spinerji (*Stenella longirostris*). Zasuk okoli svoje vzdolžne osi ponovijo nepretrgoma tudi do sedemkrat. Še bolj kot to pa navdušuje hitrost gibanja pri tem vrtnčenju. Praktično delujejo kot nekakšni svedri. Podvodno sukanje okoli vzdolžne osi je izredno dobro

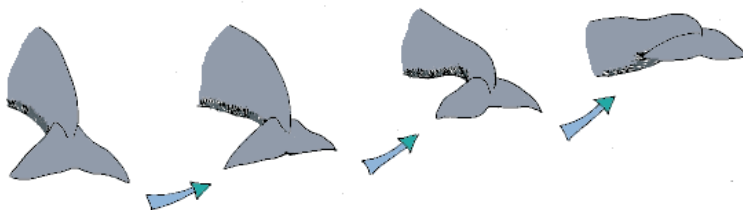


Slika 7: Sekvence fotografij vrtenja okoli vzdolžne telesne osi.

uravnoveženo in sinhronizirano z vrtilnim momentom zamaha repne plavuti in hidrodinamičnimi silami prsnih plavuti. Podobno je tudi pri skokih z zasukom. Z matematičnim modelom je možno natančno prikazati da vrtilni moment povzroči zasuk - vrtenje že predhodno pod vodo. Skratka vse je izredno usklajeno in težko je najti kakršnekoli izgube ali odvečne gibe.

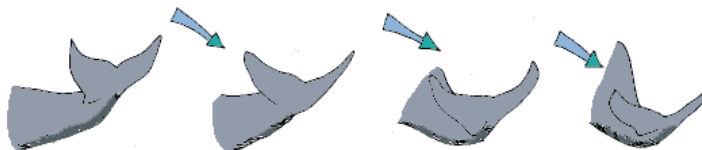
0.9 Enigma hitrosti delfinov

K učinkovitemu plavanju delfinov prispeva dejstvo, da imajo repno plavut vodoravno in da se pomikajo tako, da mahajo gor-dol (povezano z dejstvom, da morajo delati vertikalne gibe zaradi dihanja zraka). Pravzaprav je pomik repa navzgor tisti, ki daje pogon. Ko gre rep gor (delo mišic), je voda



Slika 8: Gibanje repne plavuti navzgor.

potisnjena z zgornje na spodnjo površino plavuti, pri čemer se ustvarja turbulenca na stranskem robu plavuti. Območje nizkega tlaka se ustvari pod plavutjo, ko se pomik navzgor nadaljuje, plavut (desna in leva stran) pa se upogne navzdol in s tem vleče vodo od glave in telesa nazaj. To povzroči, da se delfin pomika naprej in rahlo navzdol, proti učinku "glisiranja" (hidroplaning) prsnih plavuti. Kot rezultat tega premika naprej in dol, repna plavut (ki se še pomika navzgor) pospeši pretok vode čez telo. Plavut



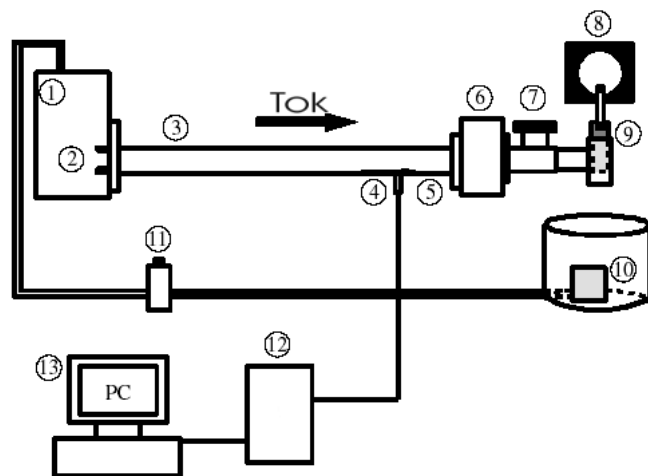
Slika 9: Gibanje repne plavuti navzdol.

se nato sprosti in začne pomik navzdol. Ob tem se plavut upogne navzgor in vodo pomika na stran. Ko gre rep dol, gre glava navzgor. V tem trenutku je tok vode podoben kot pri pomiku repa navzgor, le da ni pospeška.

Izloča tudi drobne oljne kapljice, ki naj bi služile kot lubrikant. Govora pa je celo o nekakšnih mikroporah ali podkožnih brazdah, ki naj bi jih delfini spreminjali glede na okoliški tlak in tako optimizirali tok vode preko telesa oz. njen upor.

0.10 Premagovanje turbulence z luščenjem kože

Prof. Yoshimichi Hagiwara s sodelavci iz Kyoto Instituta za tehnologijo so potrdili presenetljivo lastnost kože delfina. Ta naj bi se obnavljala in reproducirala v zelo kratkem času. Raziskave kažejo, da bi se lahko kompletna koža obnovila v času dveh ur. Pri odpadanju "lusk" bi lahko prišlo do določenega sloja, ki omogoča manjše trenje med telesom in tekočino skozi katero plava delfin. Raziskave japonskih strokovnjakov iz področja morske biologije, pomorskega inženiringa in tehnike fluidov so pripeljale do boljšega razumevanja zmanjšanja trenja pri plavanju delfinov. Povezavo med tem zmanjšanjem in skoraj idealno prilagodljivostjo delfinove kože so zagotovili z množico simulacij in sodobnih poizkusov. Uporabili so nov material, ki predstavlja nekakšen visoko prilagodljivi elastični sloj snovi ("visco-elastic wall"), ki bi lahko simulirala delfinovo kožo. Čeprav hipoteze govorijo o premagovanju delfinovega trenja, kot rezultat njihove prilagodljive površine, bi lahko sklepali, da njihova mehka in voljna trebušna koža nima enakih lastnosti kot neelastična trda koža na hrbtni strani trupa. To je bilo izhodišče za hipotezo o drugem vzroku in ne primarnem vzroku za zmanjšanje trenja. Razen tega je enemu od raziskovalcev uspelo raziskati deformacijo delfinove kože samo za nekaj sekund v času delfinovega pospeševanja. Potrdili so tudi že znano domnevo obnavljanja kompletnega kožnega tkiva v periodi dveh ur. Luščenje zgornje povrhnjice kože oziroma zelo majhnih delcev površine kože pa še ni popolnoma potrjeno, kot zveza formacije laminarnega sloja in same reprodukcije kože.



Slika 10: Shema aparatov eksperimenta: 1.protitočna komora; 2.redukcijski cevni nastavek; 3.vodoravni kanal; 4.valovna plošča; 5.senzor; 6.nižjeležeča komora; 7.ventil; 8.krožni disk; 9. vertikalno prečni vrat; 10.potopna črpalka; 11.filter; 12.anemometer; 13.računalnik.

Namen sedanjih raziskav je pojasniti kako in v kolikšnem obsegu je vpliv prilagodljivosti laminarnega sloja ter obnavljanja površja telesa prispevata k zmanjševanju kožnega trenja in uravnavanje turbulence. Pripravili so direktno računsko simulacijo za turbulentni tok blizu prilagodljivega sloja pokritega z številnimi miniaturnimi delci površja, ki se postopoma trgajo-ločujejo od sloja. Osredotočili so se na ločevanje delcev površja iz prilagodljivega površja in povezave med delci in toka tekočine. Pripravili so tudi eksperimente turbulence vodnih kanalov (slika 10) z valovitim slojem zelo tankih filmov delcev. Preiskovali so tudi efekt pospeška glavnega toka na deformacijo sloja in ločevanja delcev od površja. Poleg računskih simulacij so izdelali eksperiment s katerim so skušali simulirati delovanje reprodukcije - odpadanja majhnih folijastih delcev, ki so ponazarjali odpadle dele delfinove kože.

Zaključki: Direktna računsko simulacija in eksperimentalno delo so dokazovali nekaj ključnih ugotovitev:

1. Sloja strižne napetosti in celoten tlak je upadal s prilagodljivim slojem. Vzrok za to je število gostih vrtinčastih niti.
2. Naraščanje sloja strižne napetosti v času period, ko se veliko delcev ločuje od sloja linearnega mejnega sloja. To se dogaja zaradi pospeševanja delcev toka med delci in slojem.
3. Kot je število delcev naraščalo v odbojnem predelu so delci upadali z transportom odpadlih delcev iz mejnega sloja. To predvsem zato, ker se je skupek delcev redčil v vrtinčasti niti.
4. Z eksperimentom pri valoviti površini je bil izmerjen porast pritiska v laminarnem sloju z ločevanjem malih folijastih delcev.

0.11 Zaključek

V večini podatkov, ki sem jih uspel pridobiti ob pisanju seminarske naloge se večina avtorjev in raziskovalcev trudi priti do podatka o zmanjšanju upora in trenja, laminarnega obtekanja, redukcijskega odpadanja in obnavljanja kože. Je možno, da premalo poznamo agregat moči samega delfina? Mar ni preveč v sebo zavarovano dejstvo, da jemljemo morfološko osnovo glede na znana dejstva, ki predvsem izvirajo iz človeka? Nikjer nisem zasledil vsaj kakšen pomislek, v smeri, da bi lahko delfinova mišica delovala drugače, kot smo jo definirali. Konec koncev je lahko odpadanje in hitra reprodukcija kože samo

produkt zelo hitre celične obnove procesa v delovanju mišic delfina. Nikjer nisem zasledil nič o akumulaciji prožnostne energije mišic. Le ta je bila pred časom ena temeljnih postavk kengurujevih skokov. Na žalost človeštva in verjetno na veselje delfinov ostaja še kar dober kos nerešenih vprašanj glede njihovega vedenja in gibanja. Mogoče nam ravno to sporočajo ta prečudovita bitja s svojim simpatičnim in skrivnostnim nasmehom.

0.12 P.S.:

Za izdelavo seminarske naloge sem pregledal veliko gradiva. Tudi tistega, ki je na razpolago preko svetovnega spleta. Z žalosjo sem ugotovil, da se večina ustanov, ki opisujejo svojo dejavnost, poslužuje termina "raziskovalno delo", kot popolne farse za komercialno delo in izgovor za ujetništvo delfinov in kitov.

Literatura

- [1] Daniel Weihs: *Dynamics of Dolphin Porpoising Revisited*, Integr.Comp.Biol., 42: 1071-1078, Faculty of Aerospace Engineering Technion, Haifa, Israel (2002)
- [2] F.E.Fish and J.J.Rohr: *Review of Dolphin Hydrodynamics and Swimming Performance*, West Chester University, SSC San Diego, SSC San Diego, CA 92152-5001, Technical report 1801 (August 1999)
- [3] Robin Kerrod: *Delfini in kiti*, Svet živali, (Založba Mladinska knjiga, 2000)
- [4] Janez Strnad: *Fizika, Prvi del, Mehanika / Toplota*, Str.: 125-135, (DRUŠTVO MATEMATIKOV, FIZIKOV IN ASTRONOMOV SLOVENIJE, Ljubljana 1990)
- [5] Enciklopedija Britanika, <http://www.britannica.com/eb/article-9037804/Sir-James-Gray>, stran obiskana 06.september, 2007
- [6] Mark Carwardine: *Whales, dolphin and porpoises* (Checkmark Books, 1999)
- [7] Yoshimichi Hagiwara, Hiroshi Nagamine, Kenji Yamahata, and Ry-
oichi Matsubara: *Turbulence modification by compliant skin and strata-
corneas desquamation of a swimming dolphin*, Department of Mechan-
ical and System Engineering, Kyoto Institute of Technology, Matsug-
asaki, Kyoto 606-8585, Japan(2003)