

Univerza v Ljubljani
Fakulteta za *matematiko in fiziko*



Oddelek za fiziko

Seminar – 4. letnik

TURBULENTNO ŽIVLJENJE DELFINOV

Avtor: Maja Požar

Mentor: prof. dr. Rudolf Podgornik

Ljubljana, november 2010

POVZETEK

Turbulenca ostaja še vedno velika uganka izmed nerešenih pojavov v fiziki. Delfini, ki pri plavanju dosegajo velike hitrosti, so prav gotovo mojstri pri izkoriščanju tega fizikalnega pojava. S študijo njihovega gibanja so znanstveniki odkrili posebnosti na površini kože, s katerimi uravnavajo mejno plast, tako da zavirajo razvoj turbulence, ki zato nastaja šele v njihovi sledi. Razumevanje gibanja delfinov in njihovega mehanizma zmanjševanja upora pri gibanju skozi tekočino, bi nam lahko koristila pri razvoju novih sodobnejših plovil.

KAZALO

UVOD.....	2
1. ZGODOVINSKI UTRINKI O TURBULENCI.....	3
2. ZNAČILNOSTI TURBULENTNEGA TOKA.....	3
3. PREHOD IZ LAMINARNEGA V TURBULENTNI TOK.....	5
4. ENAČBE GIBANJA ZA TURBULENCO	6
5. DELFINI IN TURBULENCA.....	9
ZAKLJUČEK	12

UVOD

»Brbotajoči potoki in viharni vetrovi«, kot jih že stoletja opisujejo pesniki, so najbrž še danes ena največjih neznank v naravi. Veliko lažje je take in podobne naravne pojave opisati z besedami kot z matematično analizo. Prvaki v obvladovanju turbulence v naravi so delfini, ki pri plavanju dosegajo velike hitrosti. S posebnostmi na površini kože uravnavajo mejno plast, tako da zavirajo razvoj turbulence, ki zato nastaja šele v njihovi sledi.

Turbulentni tok si predstavljamo kot intenzivno mešanje tekočine, parado vrtincev in neurejenega gibanja. Za turbulentni tok ni popolne analitične rešitve za porazdelitev hitrosti turbulentnega toka niti za preproste primere, kot je tok ob ravni plošči ali tok v cevi. Pomagamo si lahko le s približnimi polempiričnimi opisi za povprečno hitrost toka in tlaka v turbulentnem toku.

Turbulenca je najbrž eden izmed najpomembnejših in hkrati najtežje razložljivih pojavov v klasični fiziki. Večina hidrodinamičnih gibanj, ki jih srečujemo v vsakdanjem življenju, se obnaša precej neurejeno. Že ob prvem opisu Navier-Stokesove enačbe so se pojavila ugibanja, ali enačba velja v vsakem primeru ali ne. Zagato je rešil Osborne Reynolds, ki je leta 1883 na podlagi opazovanj osnoval teorijo o obstoju dveh tokov: laminarnega toka, ki se giblje počasi in ima vzporedne tokovnice, ter turbulentnega toka, katerega hitrost je precej večja in imajo tokovnice neko naključno obliko [1]. Poleg tega je ugotovil še, da obstoj obeh tokov ni odvisen le od povprečne hitrosti tekočine v cevi in od njene dimenzije, temveč tudi od viskoznosti. Tako je vpeljal v hidrodinamiko Reynoldsovo število. Pri majhnem Reynoldsovem številu je tok laminaren, z njegovim naraščanjem pa postaja tok vedno bolj nestabilen in preide v turbulentni tok. Kasneje so ugotovili, da laminarni tok lahko postane turbulenten tudi, če se pojavi neka motnja v toku. Opis takih tokov je analitično skoraj nemogoč, zato se pri razlagi opremo na že poznano fiziko, modele turbulence in empirične izkušnje.

1. ZGODOVINSKI UTRINKI O TURBULENCI

Turbulentni tok je svojevrsten pojav, ki ga znanstveniki preučujejo že stoletja. Z njim so se ukvarjali: Taylor, Kolmogorov, Reynolds, Prandtl, von Karman, Heisenberg, Landau, Millikan in drugi. V ospredju raziskovanj hidrodinamičnih pojavov je bila turbulenca pri gospodu Osbornu Reynoldsu, ki je že leta 1883 vpeljal eksperimentalno določeno razmerje med hitrostjo in viskoznostjo. To brezdimenzijsko število nam podaja oceno prehoda med laminarnim in turbulentnim tokom v določenem sredstvu. Ta meja seveda ni ostra in natančno določena, je pa dober opis odvisnosti značaja toka od hitrosti. Poleg tega je Reynolds odkril tudi strižne napetosti, ki se pojavijo v turbulentnem toku. Obe odkritji sta postavili temelje nadaljnemu reševanju problema turbulence. Leta 1921 je njegov trud nadaljeval britanski znanstvenik Taylor, ki je predlagal več različnih matematičnih orodij za opis turbulentnih pojavov na majhnih območjih. Hkrati s Prandtлом je uporabil izraz »mešalna dolžina«, ki je Prandtlu in von Karmanu pomagal pri postavitvi njune teorije, v kateri sta predpostavila, da je profil hitrosti v bližini plošče logaritmičen. Meteorolog Lewis Richardson je leta 1922 napisal prvo knjigo o napovedovanju vremena s pomočjo numeričnih metod. V tej knjigi je predpostavil, da se kinetična energija velikih vrtincev v turbulenci prenaša na manjše, nakar pride do disipacije energije zaradi viskoznosti. To je bila podlaga nadaljnim raziskovanjem Kolmogorova, ki se je ukvarjal z razlago spektra turbulence. V današnjem času turbulenca še vedno ostaja analitično nerešen pojav. Zadnje razlage temeljijo celo na teoriji kaosa, nekateri pa se ukvarjajo z razlago na podlagi opazovanj pojava turbulence na morju in v atmosferi [2].

2. ZNAČILNOSTI TURBULENTNEGA TOKA

V terminološkem slovarju je beseda turbulenca definirana kot nemir, zmeda, vrtinčenje. Zadnji opis je najbližje uporabi besede v fizikalnem smislu. Po Hinzeju gre za stanje nepravilnosti v toku tekočine, kateri se večina spremenljivk (npr. hitrost, tlak...) spreminja s časom in prostorom [3]. V naravi je tako gibanje moč opazovati vsak dan, npr. letenje, vožnja z avtomobilom, gibanje rečnih voda, itd. Pri vseh naštetih pojavih najdemo ponavljajoče se značilnosti, ki so tipične za turbulentni tok [2]:

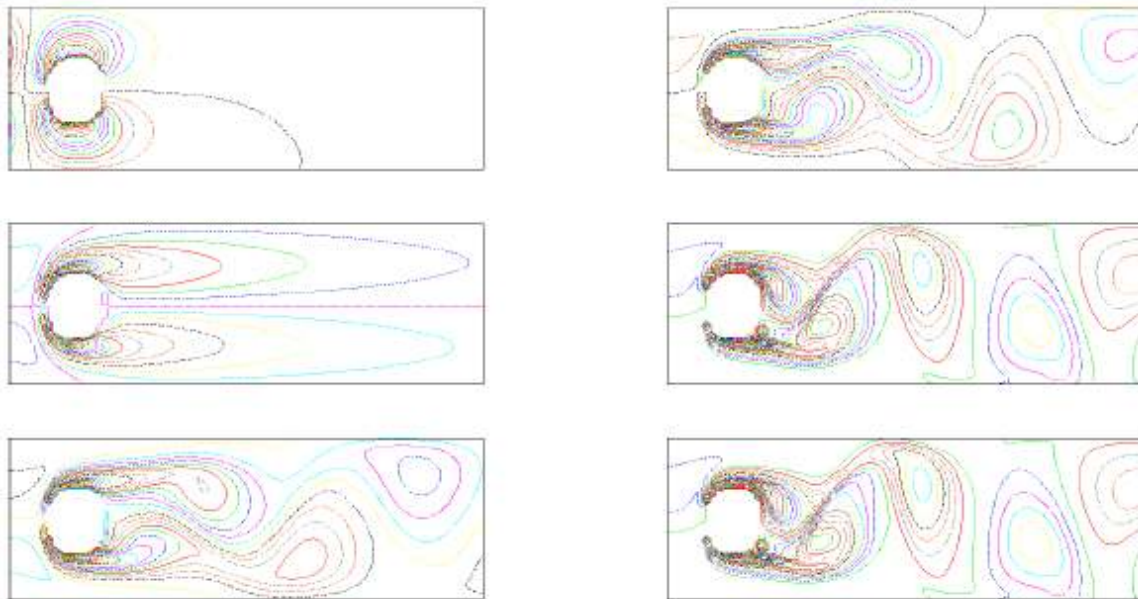
- Naključno gibanje: Turbulentni tokovi so značilni po svojem nepravilnem, nepredvidljivem kaotičnem gibanju.
- Nelinearnost: V nestabilnih tokovih že majhne nepravilnosti spontano rastejo in povzročijo velike motnje. Tako novo stanje postane povsem nestabilno, motnje se še povečajo, kar povzroči že popolnoma kaotičen in neurejen tok.
- Difuzija – mešanje: Mešanje se dogaja v vseh smereh, torej se gibalna količina iz osrednjega dela z večjimi hitrostmi zaradi mešanja prenaša v neposredno bližino stene.
- Vrtinčnost: Značilna lastnost turbulence je tudi obstoj različnih velikosti vrtincev. Vrtinci lahko dosežejo velikosti značilne dimenzije ovire ali višine turbulentnega toka.
- Disipacija: Energija se prenaša iz velikih vrtincev na manjše, nato pa pride do disipacije energije zaradi viskoznosti. Turbulentni tokovi zato potrebujejo stalno dovajanje energije, da zapolnijo izgube zaradi viskoznosti.

V splošnem velja, da je laminarni tok v tekočini pogojen z majhnimi hitrostmi, pri večjih hitrostih pa tok postane turbulenten. Bolj natančen opis odvisnosti značaja toka od hitrosti nam podaja Reynoldsovo število, ki ga definiramo kot [4]:

$$\text{Re} = \frac{\rho v D}{\eta}, \quad (2.1)$$

kjer je D značilna dimenzija ovire (npr. premer cevi), ρ gostota, v hitrost in η dinamična viskoznost tekočine. Pri velikem Reynoldsovem številu (za cevi $\text{Re} > 2300$, za tok na polneskončni plošči $\text{Re} > 500000$) bo tok turbulenten, pri manjšem Reynoldsovem številu pa laminaren. Ta meja nikakor ni ostra in nam samo pove, da se pod ali nad to vrednostjo vzdržuje enkrat oblikovani način toka [5].

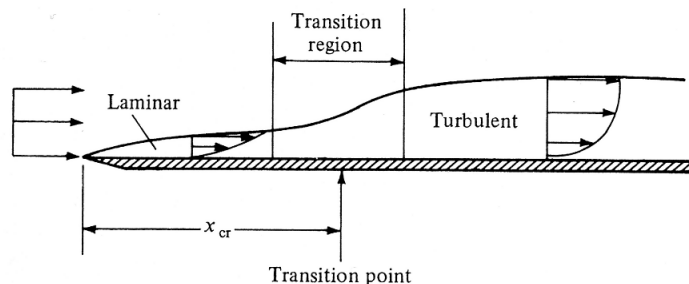
Tipičen spremljevalni pojav turbulence je tudi mešanje tekočine. Mešanje se dogaja v vseh smereh, torej se gibalna količina iz osrednjega dela z večjimi hitrostmi zaradi mešanja prenaša v neposredno bližino stene. Ker se počasne plasti ob steni zaradi mešanja stalno zadevajo v hitrejše plasti v notranjosti, jih zavirajo in zaradi tega nastajajo dodatne strižne napetosti, ki so pri večjih Reynoldsovih številih za red velikosti večje od osnovnih strižnih napetosti zaradi viskoznosti. Zaradi teh dodatnih t.i. Reynoldsovih napetosti so tudi izgube energije (segrevanje tekočine ali plina) v turbulentnem toku večje kot pri laminarnem [6]. Za turbulentni tok je značilna prisotnost rotorja hitrosti v vseh treh prostorskih smereh. Zato je tok značilno trodimenzionalen. Struktura toka je taka, da se v njem pojavljajo vrtinci različnih velikosti: od največjih, ki so istega reda velikosti kot karakteristična dimenzija objekta (npr. širina ali globina reke, premer cevi...), pa do zelo majhnih, ki nastajajo znotraj večjih. Na sliki 2.1 lepo vidimo nastajanje vrtincev pri obtekanju krogle pri različnih hitrostih tekočine.



Slika 2.1: Dvodimenzionalna vrtinčnost pri obtekanju krogle $\text{Re} = 1, 20, 70, 100, 10^4, 10^7$ [7].

3. PREHOD IZ LAMINARNEGA V TURBULENTNI TOK

Mejna plast je območje tik ob površju ovire, ki jo obliva tekočina. Za tok v tej plasti je značilno, da se mu spreminja hitrost zaradi strižnih sil, ki jih ustvarja površje, in da je hitrost tik ob oviri enaka 0. Stran od ovire namreč velja, da je hitrost v tekočini enaka kot je pred oviro in tekočina teče naprej neovirano. Debelina mejne plasti vzdolž ovire narašča, čeprav njena meja z nemotenim tokom ni ostra [4]. Za boljše razumevanje predstavimo mejno plast ob polneskončni plošči. Ob prvem stiku s ploščo je tok laminaren, nato sledi območje prehoda, v katerem se tok spreminja iz laminarnega v turbulentni, po nekem času tok postane popolnoma turbulenten. Točko prehoda smo na sliki 3.1 označili z x_{cr} .



Slika 3.1: Prehod iz laminarnega v turbulentni tok na polneskončni ravni plošči [4].

Vrednost x_{cr} je odvisna od veliko dejavnikov, ki spodbujajo nastanek turbulence v mejni plasti in tako znižujejo vrednost x_{cr} [4]. To so:

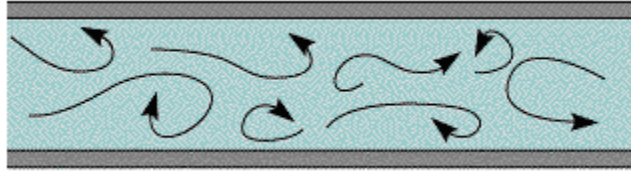
- grobost površine,
- turbulenca v prostem toku tekočine, ki zadane oviro,
- gradient tlaka (če tlak pada v smeri toka, teži k ohranjanju začetnega laminarnega toka),
- segrevanje tekočine ob površju ovire (če je plošča toplejša od tekočine),
- visoko Reynoldsovo število.

V območju prehoda med laminarnim in turbulentnim tokom se pojavljajo izbruhi vrtincev, ki se stalno premikajo po naključnem vzorcu. To področje je že precej nestabilno, kar kasneje preide v popolnoma neorganiziran turbulentni tok. V teh plasteh prihaja do mešanja delov tekočine med seboj; t.i. delci toka se gibljejo naprej in nazaj ter v prečni smeri glede na smer glavnega toka. To pomeni, da se mase z različnimi hitrostmi pomešajo med seboj in s tem vplivajo ena na drugo. Masa, ki preide iz območja z večjo hitrostjo v območje z manjšo hitrostjo, pospešuje mase z manjšo hitrostjo, medtem ko masa z manjšo hitrostjo v področju tokov z višjo hitrostjo tokove zavira. Strižne napetosti, ki se pojavijo pri takem gibanju mas, imenujemo Reynoldsove napetosti [8].

Za zmanjšanje turbulence danes uporabljajo vrsto »trikov«. Skupni namen vseh pa je čim dlje zadržati mejno plast laminarno. S takimi težavami se v prvi vrsti srečujejo aerodinamiki. V knjigi *Fluid Dynamics* [1] so podani načini, kako mejno plast lažje ohranimo laminarno. Ena izmed rešitev je, da pri oblikovanju uporabimo porozni material. Pri tem se tekočina (v tem primeru zrak) odvaja skozi porozno površino v notranjost krila. Kasneje bomo spoznali kakšne »trike« za uravnavanje turbulence uporabljajo delfini.

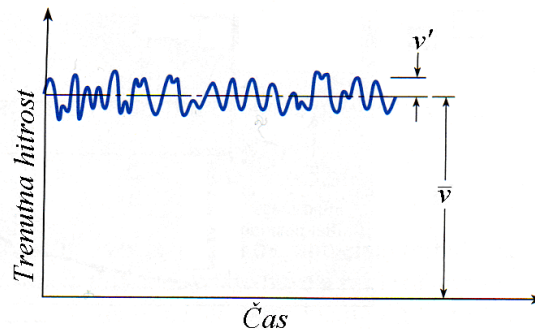
4. ENAČBE GIBANJA ZA TURBULENCO

Predstavljajmo si turbulentni tok v cevi, kot kaže slika 4.1.



Slika 4.1: Turbulentni tok v cevi [9].

Nered v toku se izraža s tem, da je profil hitrosti, pri vsakem ponovljenem poskusu drugačen, četudi poskus še tako natančno ponovimo z vsemi enakimi začetnimi parametri. Če opazujemo hitrost neke izbrane točke v toku ravne cevi, kjer je osnovni stalni tok usmerjen vzdolž cevi, dobimo graf 4.2 [8].



Slika 4.2: Graf odvisnosti hitrosti od časa za točko v turbulentnem toku [8].

Iz grafa lahko določimo povprečno hitrost točke \bar{v} :

$$\bar{v} \equiv \frac{1}{T} \int_0^T v dt \quad (4.1)$$

kjer je T časovni interval opazovanja. Trenutna hitrost v je sestavljena iz dveh delov: povprečne hitrosti in fluktuacijske hitrosti v' , ki pomeni odstopanje od srednje vrednosti. Hitrost v zapišemo kot $v = \bar{v} + v'$.

Za reševanje problema določanja parametrov turbulentnega toka moramo določiti potek hitrosti in tlakov, nato pa lahko določimo še potek turbulentnega transporta snovi. Vemo že, da lahko splošen tok nestisljive tekočine opišemo z Navier-Stokesovo enačbo:

$$\rho \left[\frac{\partial \bar{v}}{\partial t} + (\bar{v} \cdot \nabla) \bar{v} \right] = -\nabla p + \eta \Delta \bar{v} \quad (4.2)$$

in kontinuitetno enačbo:

$$\nabla \cdot \bar{v} = \frac{\partial v_x}{\partial x} + \frac{\partial v_y}{\partial y} + \frac{\partial v_z}{\partial z} = 0, \quad (4.3)$$

kjer so v_x, v_y, v_z hitrosti v smereh x, y, z , ρ je gostota tekočine, ∇p gradient tlaka in η dinamična viskoznost tekočine. Načeloma lahko z Navier-Stokesovo enačbo opišemo kateri koli tok, tako laminaren kot turbulenten. Vendar moramo pri turbulentnem toku v enačbi upoštevati trenutne vrednosti hitrostnih komponent in tlaka. Ker za inženirsko prakso navadno niso pomembne trenutne vrednosti hitrosti, ampak le časovno povprečne vrednosti $\bar{v}_x, \bar{v}_y, \bar{v}_z$, upoštevamo naslednje zveze:

$$\begin{aligned} v_x &= \bar{v}_x + v_x' \\ v_y &= \bar{v}_y + v_y' \\ v_z &= \bar{v}_z + v_z' \end{aligned} \quad (4.4)$$

Da problem nekoliko poenostavimo, vzamemo, da je tok stacionaren $\frac{\partial \bar{v}}{\partial t} = 0$. Enačbe (4.4) vstavimo v enačbo (4.2) in dobimo dinamično enačbo za opis turbulence. Nato poiščemo povprečje teh enačb, tako mnogi členi odpadejo, npr.: $\overline{v'} = 0$; $\overline{vv'} = 0$; $\overline{p'} = 0$. Tako dobimo dinamično enačbo (za vse tri smeri) v naslednji obliki:

$$\begin{aligned} \bar{v}_x \frac{\partial \bar{v}_x}{\partial x} + \bar{v}_y \frac{\partial \bar{v}_x}{\partial y} + \bar{v}_z \frac{\partial \bar{v}_x}{\partial z} &= -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{p}}{\partial x} + \nu \Delta \bar{v}_x - \left(\frac{\partial \overline{v_x'^2}}{\partial x} + \frac{\partial \overline{v_x' v_y'}}{\partial y} + \frac{\partial \overline{v_x' v_z'}}{\partial z} \right) \\ \bar{v}_x \frac{\partial \bar{v}_y}{\partial x} + \bar{v}_y \frac{\partial \bar{v}_y}{\partial y} + \bar{v}_z \frac{\partial \bar{v}_y}{\partial z} &= -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{p}}{\partial y} + \nu \Delta \bar{v}_y - \left(\frac{\partial \overline{v_x' v_y'}}{\partial x} + \frac{\partial \overline{v_y'^2}}{\partial y} + \frac{\partial \overline{v_y' v_z'}}{\partial z} \right) \\ \bar{v}_x \frac{\partial \bar{v}_z}{\partial x} + \bar{v}_y \frac{\partial \bar{v}_z}{\partial y} + \bar{v}_z \frac{\partial \bar{v}_z}{\partial z} &= -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{p}}{\partial z} + \nu \Delta \bar{v}_z - \left(\frac{\partial \overline{v_x' v_z'}}{\partial x} + \frac{\partial \overline{v_y' v_z'}}{\partial y} + \frac{\partial \overline{v_z'^2}}{\partial z} \right) \end{aligned} \quad (4.5)$$

V enačbah (4.5) smo vse člene izrazili s časovno povprečnimi vrednostmi, le zadnji trije členi so izraženi s fluktuacijami hitrosti v_x', v_y', v_z' (odstopanja od povprečnih vrednosti) [6]. Čeprav nas v praksi same fluktuacije hitrosti običajno ne zanimajo, nas pa zanima, kako ta odstopanja vplivajo na časovno povprečne vrednosti in jih skušamo na nek način izraziti s povprečnimi vrednostmi hitrosti. Zadnji trije členi v enačbah (4.5), pomnoženi še z gostoto ρ , bi dali skupaj komponente divergence tenzorja, ki ima dimenzijo napetosti. Te napetosti imenujemo Reynoldsove napetosti in nastajajo zaradi stalnega turbulentnega mešanja, poleg viskoznih napetosti. Te napetosti poskušamo izraziti s povprečnimi količinami. Reynoldsov napetostni tenzor je:

$$T_R = \rho \cdot \begin{bmatrix} \overline{v_x'^2} & \overline{v_x' v_y'} & \overline{v_x' v_z'} \\ \overline{v_y' v_x'} & \overline{v_y'^2} & \overline{v_y' v_z'} \\ \overline{v_z' v_x'} & \overline{v_z' v_y'} & \overline{v_z'^2} \end{bmatrix}. \quad (4.6)$$

Pokazali bomo najbolj preprost Boussinesquov pristop [6] k rešitvi problema. Po tem načinu turbulentne napetosti zapišemo z analognimi izrazi kot viskozne napetosti pri laminarnem toku, le da upoštevamo povprečne vrednosti hitrosti, npr. za eno komponento napetosti σ_{xy} zapišemo:

$$\sigma_{xy} = \rho \nu_{ef} \left(\frac{\partial \bar{v}_x}{\partial y} + \frac{\partial \bar{v}_y}{\partial x} \right) \quad (4.7)$$

kjer smo z ν_{ef} označili koeficient efektivne viskoznosti. Analogno bi zapisali še ostale komponente tenzorja turbulentnih napetosti. Tako bi dinamično enačbo za x, y, z smeri zdaj zapisali:

$$\begin{aligned} \bar{v}_x \frac{\partial \bar{v}_x}{\partial x} + \bar{v}_y \frac{\partial \bar{v}_x}{\partial y} + \bar{v}_z \frac{\partial \bar{v}_x}{\partial z} &= -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{p}}{\partial x} + \nu_{ef} \Delta \bar{v}_x \\ \bar{v}_x \frac{\partial \bar{v}_y}{\partial x} + \bar{v}_y \frac{\partial \bar{v}_y}{\partial y} + \bar{v}_z \frac{\partial \bar{v}_y}{\partial z} &= -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{p}}{\partial y} + \nu_{ef} \Delta \bar{v}_y \\ \bar{v}_x \frac{\partial \bar{v}_z}{\partial x} + \bar{v}_y \frac{\partial \bar{v}_z}{\partial y} + \bar{v}_z \frac{\partial \bar{v}_z}{\partial z} &= -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{p}}{\partial z} + \nu_{ef} \Delta \bar{v}_z \end{aligned} \quad (4.8)$$

Vendar s tem problema še nismo rešili, ker koeficient efektivne viskoznosti ν_{ef} ni lastnost tekočine kot koeficient laminarne viskoznosti, temveč je lastnost toka, kar pomeni, da je odvisen od kraja in časa v toku. Za določitev tega koeficienta si pomagamo z modeli turbulence in empiričnimi izkušnjami. Za reševanje zgornjih enačb uporabljamo numerične metode.

Najbolj preprost model turbulence (po Boussinsquovem pristopu) bi bil s konstantnim koeficientom ν_{ef} , ki bi ga morali določiti empirično. Kasneje so za določitev koeficienta efektivne viskoznosti uporabljali Prandtlov model »mešalne dolžine«, kjer se ν_{ef} izrazi z gradientom hitrosti in značilno dolžino l , kjer se pojavlja mešanje:

$$\nu_{ef} = l^2 \left| \frac{\partial v_x}{\partial y} \right| \quad (4.9)$$

Prednost tega modela pred konceptom $\nu_{ef} = \text{konst.}$ je v tem, da je mogoče mešalno dolžino l v določenih primerih toka dovolj realno oceniti. Vendar pa ima ta metoda več slabosti, predvsem to, da je treba l za vsako vrsto toka posebej poznati, za kar je potrebna vrsta meritev. Danes je najbolj v uporabi boljši model turbulence, t.i. k- ϵ model, ki računa direktno efektivne napetosti oz. zadnje tri člene v enačbah (4.5) na osnovi produkcije turbulentne kinetične energije k in disipacije te energije ϵ . Dobimo dve dodatni enačbi, tako da je sistem rešljiv. V teh enačbah sicer še vedno nastopa nekaj empirično določenih konstant, vendar je velika prednost tega modela v tem, da te konstante ostanejo iste za kakršnokoli vrsto toka, torej jih ni potrebno za vsak primer posebej določati z meritvami. Tako je ta model veliko bolj splošno uporaben.

5. DELFINI IN TURBULENCA

Mojstri v oblikovanju površine in s tem pri reguliranju turbulence so pliskavci ali delfini. Njihova zunanja plast kože je zelo prilagodljiva. S posebnim mehanizmom uravnavajo mejno plast, tako da zavira razvoj turbulence, saj le ta nastaja šele v njegovi sledi. Delfini (lat. *delphinidae*) živijo v vseh svetovnih morjih. Poznamo jih 34 vrst in jih uvrščamo v red kitov. Spadajo torej med morske sesalce, zaradi tipičnih lastnosti, kot so: dihanje s pljuči, živorodni mladiči, toplokrvne živali... Delfini so edinstveno prilagojeni za morsko okolje. Telo je posebne hidrodinamske oblike in njegova fiziologija se močno razlikuje od rib in drugih morskih živali. Npr. skeletna struktura prsne plavuti spominja na človeško roko z nadlahtnico, podlahtnico in prstnimi kostmi. Toda to je zgolj ena od številnih notranjih struktur, ki kaže na evolucijo delfinov iz kopenskih prednikov.

Navaden delfin je prvak v hitrosti med živalmi njegove velikosti. Na odprtem morju preseže hitrost 15 m/s (54 km/h). Reynoldsovo število za delfine pri taki hitrosti je ocenjeno na $2 \cdot 10^7$, koeficient upora okrog 0,007 do 0,008, kar pomeni silo upora med 490 in 780 N [10]. Za primerjavo naj omenimo, da bi bil upor krogle po teh izračunih 50-krat večji, upor podobnega umetnega objekta pa za faktor 10 večji. Glavna značilnost, ki omogoča delfinom doseganje velikih hitrosti je sama oblika telesa. Oblika delfina močno spominja na skico 3.1, ki prikazuje prehod iz laminarnega v turbulentni tok na polneskončni ravni plošči. Njegova razgibana oblika pomaga pri zmanjševanju upora pri gibanju skozi tekočino.

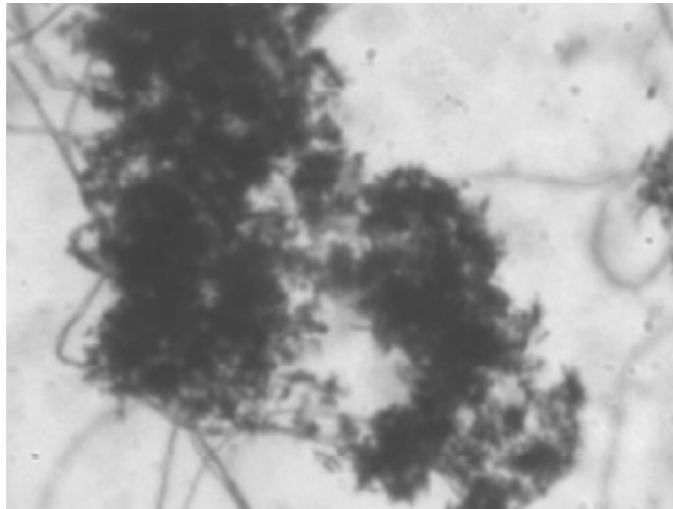


Slika 5.1: Navadni delfin [11].

Telo delfinov je prekrito s čvrstim slojem maščevja in kože, sestavljene iz treh plasti: hypodermis (spodnja plast), dermis (srednja plast) in povrhnjica. Vrhnja plast je običajno tudi desetkrat debelejša od povrhnjice kateregakoli sesalca, seveda pa debelina varira glede na življenske razmere v katerih živi delfin, predvsem od temperature morja. Zgornji sloj kože zamenjujejo zelo hitro, vsake dve uri. Konstantno obnavljanje kože omogoča delfinu stalno gladkost površine, kar pomeni manj upora na sami površini kože in posledično daljšo laminarno plast. Poleg tega kosmiči oluščene kože pomagajo zmanjševati vrtince, ki nastajajo pri gibanju skozi tekočino. Posledično se zato zmanjšuje turbulentno območje v neposredni okolici telesa, kar pomeni laminarno plast tekočine ob delfinu [12].

Izsledki raziskave opravljene na Institutu za tehnologijo v Kyotu na Japonskem [13], so pokazali, da struktura povrhnjice kože omogoča delfinom kontroliran laminarni sloj na površini oz. zmanjševanje vrtincev okoli telesa pri plavanju. To pomeni zmanjšanje trenja v njegovi okolici in uravnavanje turbulence. Izvedeno je bilo večje število poskusov pri različnih tokovih. Z napravo za simulacijo površine delfina (aluminijasta plošča) so simulirali povrhnjico, na kateri so namesto pravih slojev roženice uporabili umetno narejen polimer. Lastnosti delfinove oluščene kože ni mogoče povsem simulirati, saj se t.i. luske razkrajajo zelo počasi, med procesom razkrajanja pa se celo združujejo v večje kosmiče (slika 5.2). Kljub temu so računalniške simulacije pokazale zmanjšanje turbulence na površini. Iz izvedenih simulacij in eksperimentov so potegnili naslednje zaključke [13]:

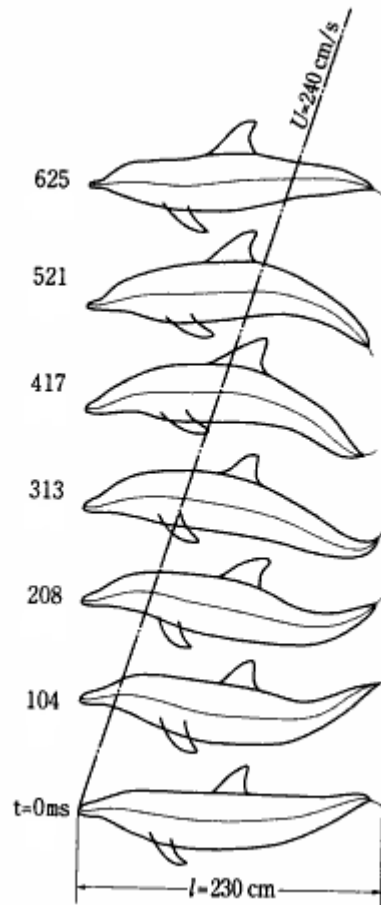
- na površini se je zmanjšal tlak in strižne napetosti, kar naj bi bila posledica lasnic oz. zelo tankih gostih niti, ki jih tvori razkrajajoča se povrhnjica (slika 5.2).
- poleg tega so se strižne napetosti povečale med obdobji povečanega »luščenja povrhnjice« v linearno plast. To je zato, ker je število lusk dejansko pospeševalo tok med delci in povrhnjico.
- v višjih plasteh tekočine, ko se luske združujejo v večje kosmiče, se posledično zmanjšuje strižna napetost med plastmi zaradi njihovega potovanja med plastmi tekočine. To pa zato, ker se tvorijo kopice lusk, kar zmanjšuje število prostih lasnic, ki povzročajo vrtince.



Slika 5.2: Roževinast sloj kože delfina, ki se odlepi pri menjavanju povrhnjice [13].

Podrobnejši pogled na površino delfina razkrije mikro grebene, katerih namen je zajetje molekul vode [14]. Na površju delfina se ustvari vodna površina, ki omogoča manjše trenje pri plavanju. Med plastmi tekočin (voda-voda) je manjše trenje, kot med tkivom in tekočino (koža-voda). Posledično ima zato delfin manjši upor pri plavanju. To lastnost danes uporabljajo pri izdelavi potapljaških oblek. Zaradi teh mikro grebenov je povrhnjica delfinov tudi bolj upogljiva. S povečanjem hitrosti v nekem trenutku zaradi trenja ob stenah plavalca pride do »odvajanja« toka od sten – oblikuje se turbulentni tok. Upogljiva povrhnjica začne valovati, kar še dodatno zmanjšuje učinek turbulence na površini delfina.

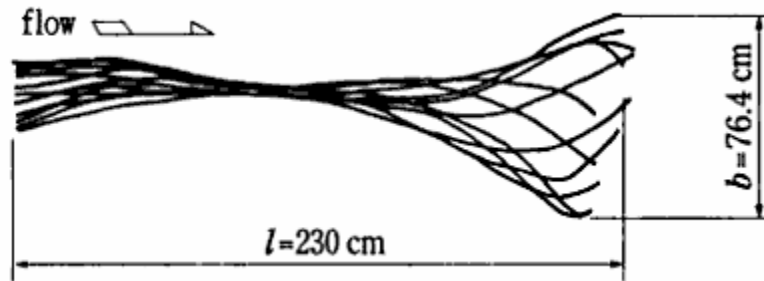
Najmočnejši del delfinovega telesa je repna plavut. Z razliko od rib imajo delfini repno plavut obrnjeno vodoravno. Njihova značilnost je, da z njo mahajo gor in dol, kar jim omogoča sunkovito gibanje in močan odziv v vodi. Potisk generira v celoti samo z gibanjem repne plavuti. Na sliki 5.2 lahko vidimo cikel gibanja repne plavuti.



Slika 5.2: Perioda gibanja repne plavuti delfina [10] (meritev je bila izvedena z delfinom velikosti 230 cm, pri hitrost plavanja 2,4 m/s, frekvenca 1,41 Hz).

Pri gibanju repne plavuti navzgor se pod plavutjo ustvari nižji tlak, kar povzroča hitrejši pretok vode od glave nazaj po spodnjem delu telesa. Kot smo že omenili je nastanek turbulence v mejni plasti pogojen tudi z gradientom tlaka; če tlak pada v smeri toka, teži k ohranjanju začetnega laminarnega toka. Glavo premika kontra smeri delovanja plavuti, torej ko gre repna plavut navzgor upogne glavo rahlo navzdol. Ko se repna plavut upogne navzdol, premakne delfin glavo rahlo navzgor. Tipično je repna plavut tako močna, da se že z enim zamahom lahko poženejo celo navpično.

Na sliki 5.3 so zajeti premiki telesne osi delfina v eni periodi repne plavuti.



Slika 5.3: Premiki telesne osi delfina v eni periodi [10] (meritev je bila izvedena z delfinom velikosti 230 cm, hitrost plavanja 2,4 m/s, frekvenca 1,41 Hz)

Iz sheme lahko razberemo naslednje karakteristične značilnosti delfinov, ki jih ne najdemo pri nobeni drugi živalski vrsti:

- oscilacije glave in repne plavuti nista simetrični – amplituda nihanja glave je precej manjša od nihanja repne plavuti
- amplituda nihanja repne plavuti doseže velikost 1/3 celotne velikosti delfina
- nihanje telesne osi ima vozle ravno v najširšem delu telesa, torej kjer je presek telesa največji.

Karakteristike, ki se močno razlikujejo od gibanja rib, najbrž izhajajo iz dejstva, da so delfini kot sesalci nekoč živeli na morskih obalah in ne v vodi [10]. Takšno biološko ozadje pomeni, da so bili kot sesalci primorani razviti drugačen način plavanja, če naj bi v boju za hrano tekmovali s prilagojenimi morskimi tekmeci.

ZAKLJUČEK

Turbulenca ostaja še vedno velika uganka izmed nerešenih pojavov v fiziki. Po vsem svetu se veliko ukvarjajo z njo, saj je prisotna v mnogih praktičnih fizikalnih problemih. Teoretični opis kljub velikemu naboru enačb, ki jih izpeljujejo različne teorije, ostaja skrita neznanka, saj ne poznamo njihovih rešitev. Četudi bi lahko teoretično opisali tak kaotičen sistem v neskončnem prostoru in brez začetnih pogojev, nam v inženirskem smislu ne bi prineslo veliko koristi. Tak sistem bi se ob mejnih pogojih in v končnem prostoru še vedno gibal nepredvidljivo. Razumevanje gibanja delfinov in njihovega mehanizma zmanjševanja upora pri gibanju skozi tekočino, bi nam lahko koristila pri razvoju novih sodobnejših plovil, podmornic in čezoceanskih ladij. Težava se sicer pojavlja ne zgolj pri razumevanju samih pojavov, temveč tudi pri sestavi materialov, ki bi omogočali posnemanje živih organizmov. Vsekakor pa nova raziskovanja in metode pripomorejo k boljšemu razumevanju v praksi in s tem pomagajo inženirjem pri dizajniranju aero- in hidrodinamičnih oblik.

LITERATURA

- [1] William F. Hughes in John A. Brighton, *Fluid Dynamics* (McGraw-Hill, New York, 1999).
- [2] Pijush K. Kundu: *Fluid Mechanics*, Academic Press, Inc., California, 1990.
- [3] Rolf H. Sabersky, Allan J. Acosta, Edward G. Hauptmann in E. M. Gates, *Fluid Flow* (Prentice Hall, New Jersey, 1999).
- [4] John D. Anderson, Jr., *Fundamentals of Aerodynamics* (McGraw-Hill, New York, 2001).
- [5] Dali Đonlagić, Denis Đonlagić, *Merjenja pretokov fluidov* (Fakulteta za elektrotehniko, računalništvo in informatiko, Maribor, 1998).
- [6] Rudi Rajar, *Hidromehanika* (Fakulteta za arhitekturo, gradbeništvo in geodezijo, Ljubljana, 1986).
- [7] <http://www-f1.ijs.si/~rudi/lectures/mk-1.9.pdf>
- [8] Clayton T. Crowe, Donald F. Elger in John A. Roberson, *Engineering Fluid Mechanics* (John Wiley & Sons, Inc., 2005).
- [9] www.cheng.cam.ac.uk/.../ELEC/I7html/hydro.html (15.08.2010)
- [10] Minoru Nagai, *Thinking Fluid Dynamics with Dolphins* (Ohmsha, Ltd., 2002)
- [11] <http://www.oceanwideimages.com/> (10.08.2010)
- [12] <http://physicsworld.com/cws/article/news/19533> (2009)
- [13] Hiroshi Nagamine, Kenji Yamahata, Yoshimichi Nagiwara, Ryoichi Matsubara, *Turbulence modification by compliant skin and strata-corneas desquamation of a swimming dolphin* (Journal of Turbulence 5, IOP Publishing Ltd, 2004)
- [14] http://www.dolphins.org/marineed_physiology.php (15.08.2010)