

SLOVENSKÝ ZVÄZ JACHTINGU

Závěrečná práce k získaniu kvalifikácie tréner I. triedy SZJ

Téma: Fyzikálne základy jachtingu

Dátum: 16.6.2023

Vypracoval: Tomáš Ilenčík

Obsah

1. Úvod.....	3
2. Plachetnica v kocke.....	4
2.1 Smery plachtenia.....	4
2.2 Ovládanie lode a plachiet.....	5
3. Prečo sa plachetnica pohybuje.....	7
3.1 Aerodynamické sily.....	7
3.2 Hydrodinamické sily.....	11
3.3 Zdanlivý vietor.....	14
3.4 Uhol dryfu.....	15
3.5 Profil plachty.....	16
4. Slovník jachtárskych termínov.....	17
5. Záver.....	18
6. Zoznam použitej literatúry a fotodokumentácie.....	19

1. Úvod

Plachetnica je takmer dokonalý vynález, ktorý využíva prirodzenú silu vetra a vody, pričom relatívny chaos premieňa na poriadok a smer. Pre jachtára je veľmi dôležité aby pochopil, akým spôsobom nastáva táto zmena. Ak pochopí teóriu, ktorá podmieňuje správanie sa lode, a pridá trochu praxe, dokáže na otvorenej vode zvládnuť takmer každú situáciu. Odmenou za námahu je pre dobrého jachtára pocit dokonalého ovládnutia plachtiacej lode, dosiahnutie rovnováhy prírodných síl a nádherného prostredia, ktoré ho obklopuje.

Aj keď táto práca by iste poslúžila aj nie úplným nováčikom v jachtingu, ja som sa ju rozhodol napísať pre tých, ktorí sa s jachtingom ešte nestretli a takto im priblížiť tento nádherný šport.



2. Plachetnica v kocke

Plachetnica sa pohybuje súčasne v dvoch prostrediach: lodný trup (obr.1) vo vode a plachty (obr.2) vo vzduchu. Obe zložky sa navzájom dopĺňajú – plachetnica sa pohybuje efektívne vtedy, keď má správne navrhnutý, čistý a hladký trup a keď plachty správneho strihu sú správne nasadené. Dobré plachty samy osebe však nezmenia starý trup na rýchlejší a aj najdokonalejšia pretekárska loď s výborným výstrojom stratí svoj účel nesprávnym ovládaním.



Obr.1



Obr.2

2.1 Smery plachtenia

Základné smery (kurzy) plachtenia sú kurz ostro proti vetru, kurz na bočný vietor a kurz na zadný vietor. Medzi týmito základnými smermi existujú medzistupne – predbočný a zadbočný kurz.

Plavba na zadný vietor (plavba po vetre) je začiatočníkovi najľahšie pochopiteľná. Je logické, že na zachytenie zadného vetra je potrebné nastaviť maximálnu plachtovú plochu.

Plavba na bočný vietor a ostro proti vetru: Plachetnica sa plaví na bočný vietor vtedy, keď je smer vetra takmer kolmý na smer plavby. Ostro proti vetru sa plachetnica dokáže pohybovať v uhle približne 45 stupňov. Pri týchto kurzoch sa tvar plachty mení na tvar krídla, tieto kurzy si z fyzikálneho hľadiska preberieme v ďalšej kapitole.

2.2 Ovládanie lode a plachiet

Na držanie a zmenu smeru sa na plachetnici používa plutva a kormidlo (obr.3).



Obr.3

Na ovládanie plachiet sa používajú laná rôznych hrúbok. Laná slúžiace k nastavovaniu polohy plachiet voči lodi vo všeobecnosti nazývame oťaže, v starších publikáciách môžeme nájsť aj názov liace (obr.4).



Obr.4

Aby jachtár vedel určiť smer vetra, používa sa na plachetnici jednoduchý mechanický ukazovateľ smeru vetra, v jachtárskom žargóne prezívaný frklík, vejička či dokonca veterná korouhvička (obr.5)



Obr.5

Na určenie vetra nám však poslúžia aj okolité predmety, s ktorými vietor dokáže pohybovať a natáčať či zohýbať ich tak v smere vetra ako sú stromy či dokonca stúpajúci dym/para z komína.

3. Prečo sa plachetnica pohybuje

Sily pôsobiace na pohybujúcu sa loď sa dajú rozdeliť do dvoch skupín:

na sily – aerodynamické, hydrodynamické

Aerodynamické sily vznikajú na plachte v dôsledku prúdiaceho vzduchu, hydrodynamické vznikajú vo vode na laterálnej ploche, teda na celej zanorenej časti trupu, plutvy a kormidla.

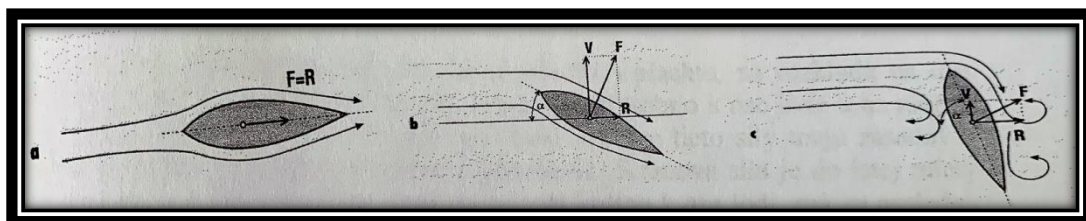
3.1 Aerodynamické sily

Pohonná sila lode vzniká pôsobením prúdiaceho vzduchu – vetra, ktorý pôsobí na naše oplachtenie. Plachta sa pritom chová ako prekážka, ktorú musí vietor obísť. Pokiaľ nastavíme určitý uhol nábehu alfa, rozdelí sa prúd na prednej strane na dve časti – prúdnice.

Tieto prúdnice sa za prekážkou zase spoja, ale celkovo každá vykoná inak dlhú cestu (vzdialenosť). Tá, ktorá prejde dlhšiu cestu, musí ísť rýchlejšie – vzniká podtlak /predná strana/ - a tá, ktorá postupuje pomalšie, vytvára pretlak /zadná strana/. Podtlak na zúveternej strane je výrazne väčší /2-3x/ ako pretlak na náveternej strane. Výslednicou týchto dvoch síl je vztlak, ktorý pôsobí kolmo na smer prúdenia. Vztlak potom spoločne s odporom vytvára výslednú aerodynamickú silu. Jej veľkosť je závislá na uhle medzi plachtou a smerom prúdenia a ďalej približne priamo úmerne na:

- Ploche plachty. Keď sa plocha plachty zmenší o polovicu, zmenší sa sila v plachte o polovicu.
- Kvadrátu rýchlosti vetra. Keď sa sila vetra zdvojnásobí, štvornásobí sa sila v plachte.

Uhol nábehu tu ale hrá veľkú rolu. Na obr.6 je vidieť, že ak je uhol nábehu nulový, rovná sa aj vztlak nule. Pri postupnom zväčšovaní veľkosti tohto uhla sa zväčšuje aj vztlak až do okamihu kde sa plynulé laminárne prúdenie začne narušovať a vzniká vírenie.



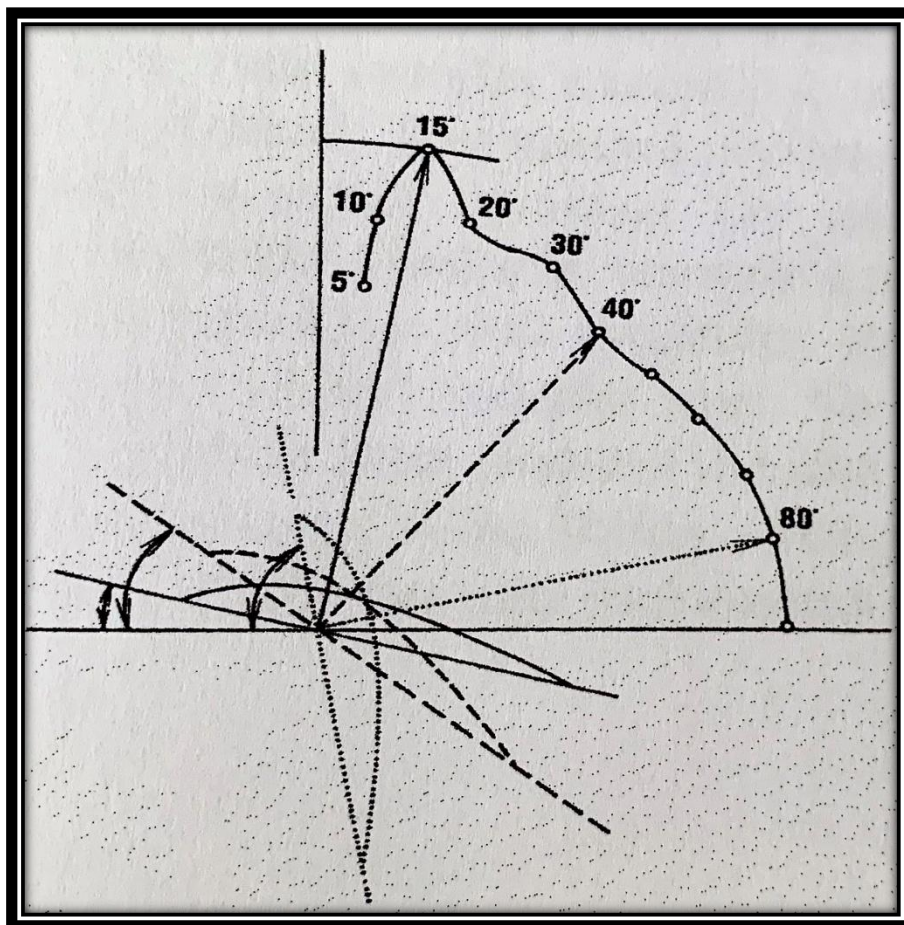
Obr. 6

V – vztlak, R – odpor, F – výsledná aerodynamická sila

Ako sa mení veľkosť celkovej aerodynamickej sily v závislosti na uhle nábehu je vidieť na grafe č.1. Pre každý tento uhol ukazuje smer stanovenej sily vektor, ktorého dĺžka je závislá na veľkosti sily. Spojením konečných bodov sa vytvára polárna krivka, ktorá ukazuje zmenu veľkosti sily v závislosti na uhle nábehu.

Od 5 do 15 stupňov narastá veľkosť sily proporcionálne, ale za touto najvyššou hranicou jej hodnota prudko klesá. Nastáva turbulencia a zväčšuje sa odpor. Je treba si všimnúť, že len minimálna zmena uhla vo vrcholovej hranici 15 stupňov, spôsobuje prudké zníženie aerodynamických síl, a preto je pre maximálny výkon presné nastavenie plachty veľmi dôležité.

Uvedený graf samozrejme platí len pri priemernej plachte. Tie sa ale od seba veľmi líšia, a to predovšetkým svojim tvarom a hĺbkou profilu. Tieto dve vlastnosti veľmi výrazne ovplyvňujú nielen to, pri akom uhle k odtrhnutiu prúdnicе dôjde, ale tiež celkovú veľkosť aerodynamickej sily. Polárna krivka potom môže byť čiastočne iná.



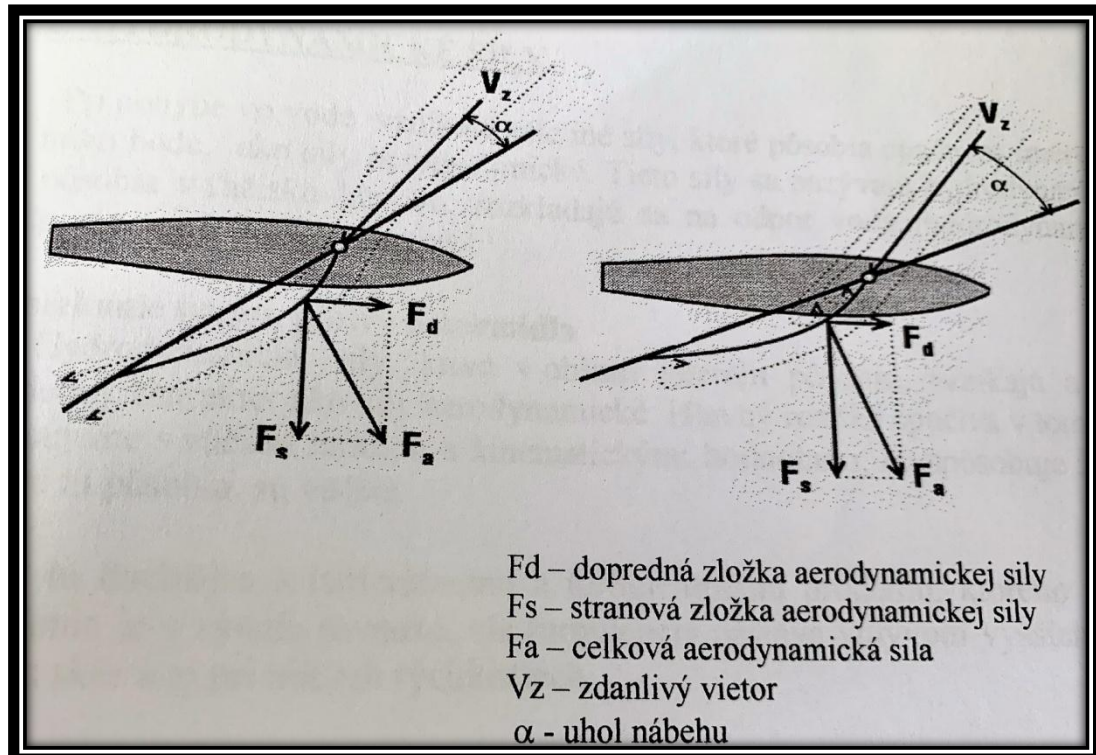
Graf .1 Veľkosť aerodynamickej sily pri uhle nábehu 15, 40 a 80 stupňov

Rozklad aerodynamických síl

Výsledná aerodynamická sila, ktorá pôsobí v plachte, sa rozkladá na dve základné časti – na zložku stranovú, ktorá pôsobí kolmo k ose lode a na zložku doprednú, ktorej vplyv je v smere osi lode. Obidve tieto sily majú zásadný a vzájomne úplne rozdielny význam a pôsobenie. Stranová sila je do istej miery nežiaducim produktom, ktorý tým, že pôsobí kolmo k ose lodi, má za následok stranové splavovanie a tiež naklonenie lode na zúveternú stranu. Naopak dopredná sila je vlastná sila, ktorá spôsobuje pohyb lode dopredu.

Z vyššie uvedeného grafu je tiež zrejmé, že veľkosť celkovej aerodynamickej sily je závislá na uhle nábehu alfa. Súčasne je ale tiež nutné si uvedomiť, že rôznym uhlom nábehu sa nemení iba celková veľkosť aerodynamickej sily, ale mení sa tiež vzťah, medzi jej dvoma zložkami.

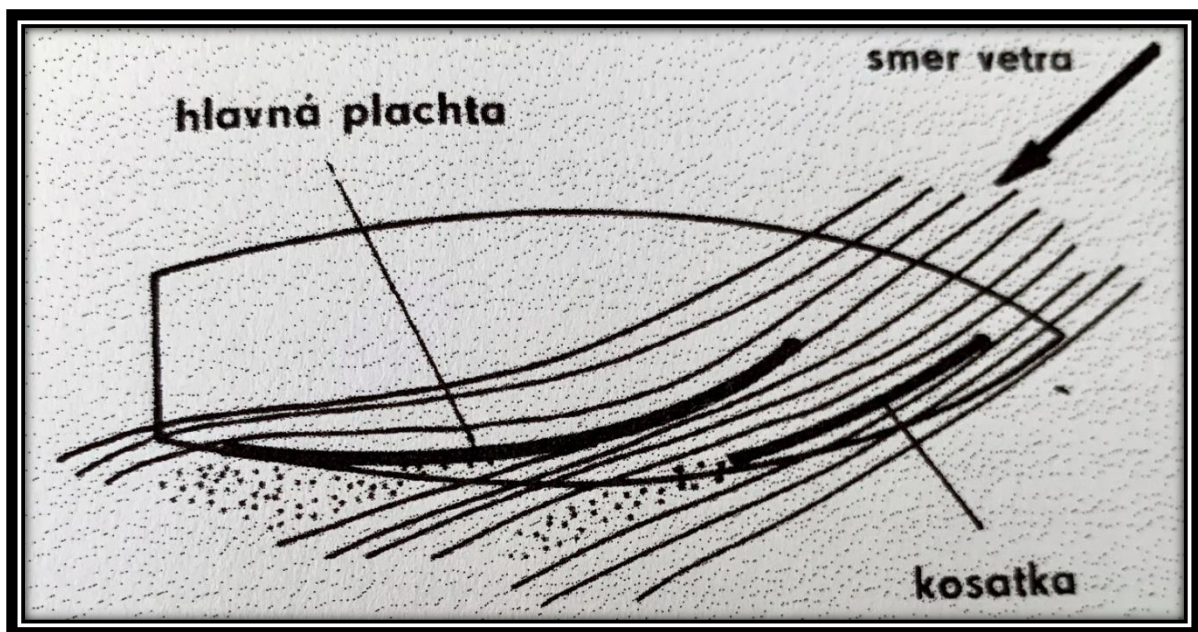
Ak je plachta pritiahnutá príliš blízko – zvýši sa uhol nábehu a dochádza na nej k turbulentnému prúdeniu. To má za následok veľké zvýšenie stranovej zložky a naopak zníženie doprednej zložky. Výsledkom potom bude, že loď stratí rýchlosť a nastane nebezpečenstvo, že sa loď prevráti.



Obr.7 Veľkosť zložiek aerodynamickej sily v závislosti na uhle nábehu alfa

Súčinnosť hlavnej plachty a kosatky

Kosatka je bezrahnová plachta umiestnená na prove (spici) lode. Kosatka pomáha vytvárať dýzový účinok. Dýzový účinok je taká spolupráca hlavnej plachty a kosatky, pri ktorej sa zvýši výkon plachiet správnym využitím aerodynamických vlastností štrbiny medzi hlavnou plachtou a kosatkou na zrýchlenie prietoku vzduchu na zúveternej strane hlavnej plachty. Zároveň sa presúva oblasť turbulentného obtekania smerom k zadnému lemu hlavnej plachty. Dýzový účinok kosatky je však využiteľný len do určitej hranice škrtenia štrbiny a do určitých rýchlostí prúdenia vzduchu v nej. Na dosiahnutie dýzového účinku kosatky má vplyv aj jej tvar. Smer prúdenia vzduchu musí byť rovnobežný s povrchom hlavnej plachty po celej výške štrbiny. Pre to je dôležitý nielen strih kosatky a hlavnej plachty, ale aj smer ťahu oťaží kosatky a ich primerané napnutie.



Obr.8 Dýzový účinok kosatky

3.2 Hydrodynamické sily

Pri pohybe vo vode vznikajú ešte iné sily, ktoré pôsobia opačným smerom a v inom bode, ako sily aerodynamické. Tieto sily sa nazývajú hydrodynamické a pôsobia v ťažisku laterálu, rozkladajú sa na odpor vody /hydrodynamický odpor/ a priečny odpor /vztlak/.

Obtekanie trupu, plutvy a kormidla

Hydrodynamické sily, ktoré v oblasti laterálu pôsobia, vznikajú a majú podobný charakter ako sily aerodynamické. Hlavný rozdiel spočíva v tom, že tu pracujeme s väčšou hmotou a kinetickými hodnotami, čo spôsobuje že sily, ktoré tu pôsobia sú väčšie.

Tiež tu dochádza k laminárnemu a turbulentnému prúdeniu, ktorého vznik a pôsobenie je v zásade rovnaké, ale turbulencia nastáva vplyvom vyšších hodnôt oveľa skôr a aj pri nižších rýchlostiach.

Stabilita plachetnice

Stabilita plachetnice závisí od tvaru trupu a od konštrukčného riešenia lode. Plachetnica musí byť stabilná, odolná proti prevráteniu, schopná odolávať vychýľujúcim silám a vracat sa do vzpriamenej polohy, prípadne navrhnutá tak aby toto vedela zabezpečiť posádka presúvaním vlastnej telesnej hmotnosti. Tiaž lode so sťažňom a plachtou, vrátane tieže posádky, pôsobí ako výslednica v pôsobisku tiaže G . Trup lode je ponorený tak hlboko, aby vytlačil množstvo vody, ktoré má rovnakú tiaž. Výtlak je sila, pôsobiaca proti tiaži lode s posádkou, jej výslednica pôsobí v bode výtlaku F .

Keď je plachetnica v kolmej polohe vzhľadom na vodnú hladinu, ťažisko tiaže aj výtlaku leží v rovine prechádzajúcej os symetrie lode. Pri nachýlení lode účinkom vetra o uhol α , zmení sa tvar ponorenej časti trupu a pôsobisko výtlaku zmení svoje miesto. Ak posádka nepresúva svoju hmotnosť (nevyvažuje), pôsobisko tiaže zostáva nezmenené. Dvojica síl tiaže G a výtlaku V , pôsobí na premenlivom ramene h ako vzpriamujúci moment – moment stability. Zosilnením tlaku vetra sa náklon zväčšuje, rameno h vzpriamujúceho momentu sa znižuje. Pri kritickom náklone je rameno nulové, teda aj vzpriamujúci moment je nulový. Pri väčšom náklone, ako je kritický, zmení sa smer pôsobenia momentu dvojice síl a loď sa prevráti. Na malých plutvových plachetniciach možno premiestňovať aj pôsobisko tiaže

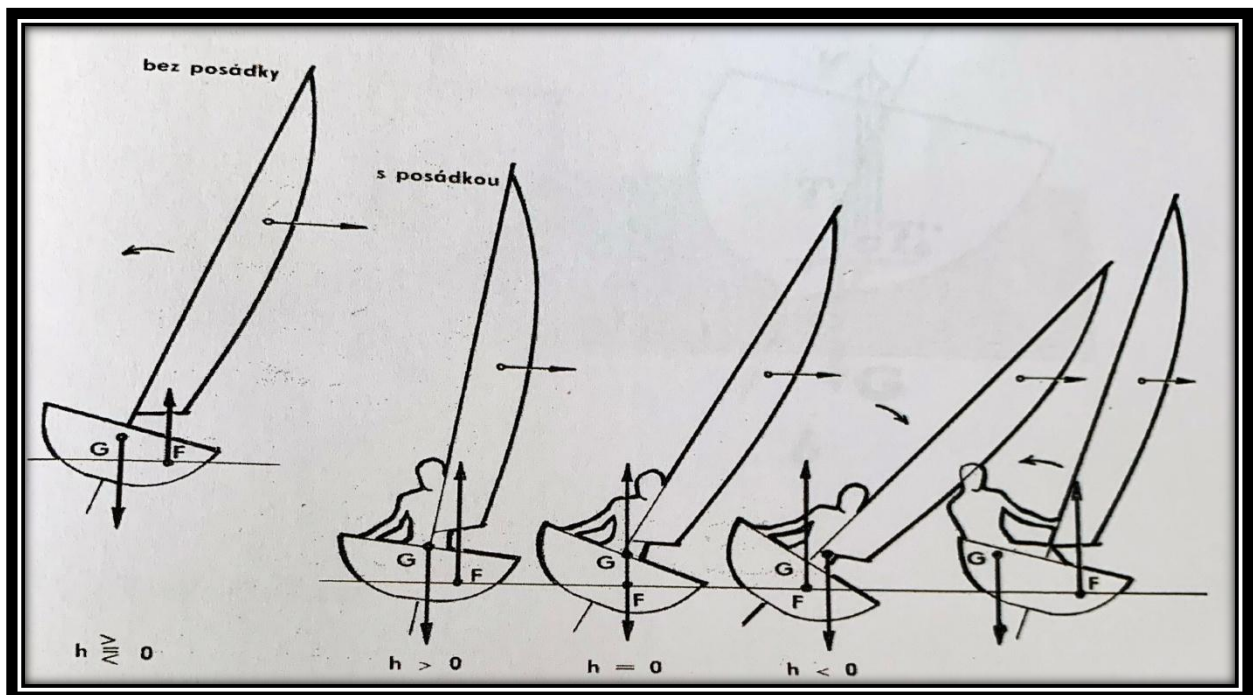
posádky – vyvažovaním (obr.9), čím zvyšujeme stabilitu lode. Okrem priečnej stability plachetnice nesmieme zabudnúť ani na stabilitu pozdĺžnu. Pri plavbe na zadný vietor, alebo pri vychádzaní na vlnu, či schádzaní z vlny má prova lode tendenciu ponárať sa do vody. V kritických situáciách môže loď urobiť aj „kotrmelec“ dopredu. Na malých, krátkych plachetniciach zvyšujeme pozdĺžnu stabilitu premiestňovaním posádky smerom dozadu (obr.10) alebo zmenou kurzu plavby na bočný vietor.



Obr.9 Vyvažovanie



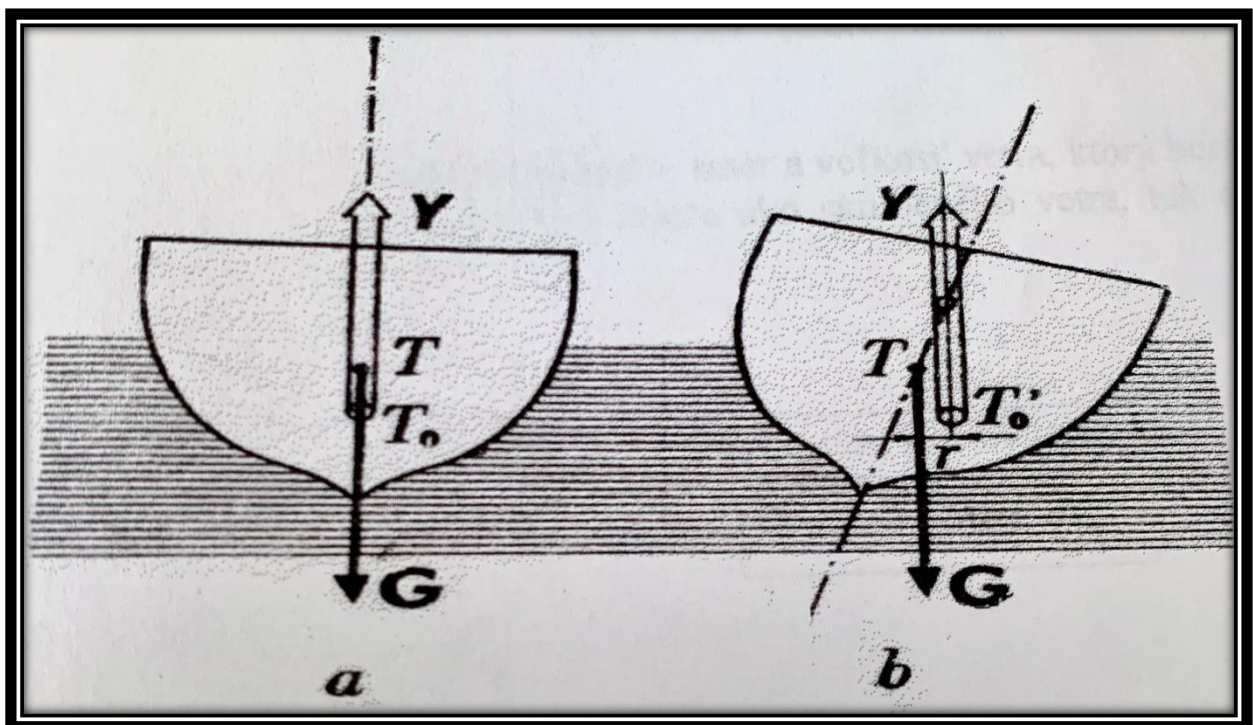
Obr.10 Zvyšovanie pozdĺžnej stability



Obr.11 Priečna stabilita plutvovej plachetnice

Stabilita plávajúceho telesa

Na plávajúce teleso pôsobia dve sily: tiaž telesa v jeho ťažisku T , v smere zvislom dole a vztlaková sila v ťažisku vytlačenej tekutiny T_0 , zaplňujúca priestor, príslušný ponorenej časti telesa v smere zvislom nahor (obr.12). Plávajúce teleso bude v rovnováhe, ak výslednica oboch síl a výsledný moment oboch síl, sa bude rovnať nule. Pre rovnováhu je teda nutné a stačí, aby sa tiež telesa rovnala tiaži tekutiny vytlačenej ponorenou časťou, a aby ťažisko telesa T a ťažisko vytlačenej tekutiny T_0 ležali na tej istej vertikále. Táto priamka sa nazýva osou plávania. Ak je teleso homogénne a symetrické, každá os symetrie, na ktorej leží aj ťažisko telesa, môže byť osou plávania. Pri predpokladanom veľmi malom vychýlení z rovnovážnej polohy nebude už ťažisko telesa a ťažisko vytlačenej kvapaliny ležať na tej istej vertikále, to znamená, že obe pôsobiace sily, tiaž G i vztlaková sila Y , rovnakej veľkosti, ale opačných smerov, tvoria dvojicu síl s momentom $D=r.Y$, ktorá má snahu buď výchylku zväčšovať, alebo znižovať, tj. Vrátiť teleso do pôvodnej polohy.



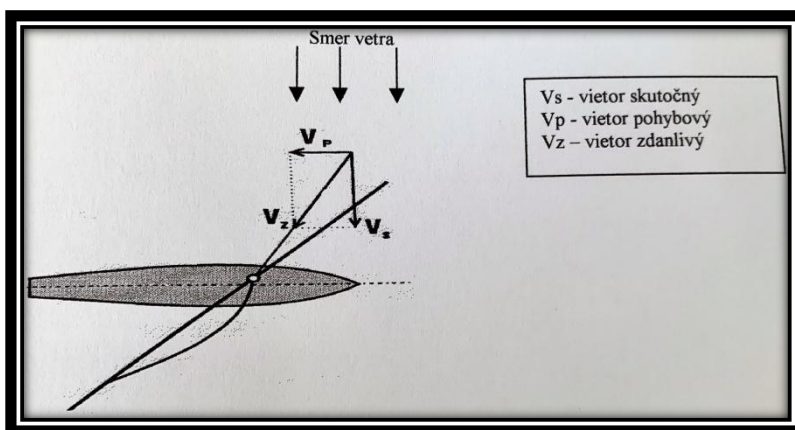
Obr.12 Stabilita plávajúceho telesa

3.3 Zdanlivý vietor

Vietor, ktorý pôsobí na naše oplachtenie a ktorý pri jazde tiež vnímame, je tzv. zdanlivý vietor V_z . Ten vzniká vektorovým súčtom skutočného vetra V_s a vetra pohybového V_p , ktorý je spôsobený pohybom lode dopredu. Táto skutočnosť je veľmi dôležitá a je nutné si túto skutočnosť všimnúť. Ak sa budeme pohybovať po vodnej hladine úplne konštantnou rýchlosťou, 20km/h a vietor bude mať tiež konštantnú rýchlosť 20 km/h, môžu vzniknúť štyri možnosti ako budeme vietor na lodi cítiť:

- 1 . Pokiaľ bude absolútne bezvetrie, budeme registrovať pohybový vietor presne proti smeru jazdy a jeho veľkosť bude zodpovedať našej rýchlosti – 20 km/h
2. Keď bude skutočný vietor - 20km/h fúkať proti smeru našej jazdy, budeme cítiť na lodi silu vetra 40 km/h
3. Pokiaľ bude vietor s rýchlosťou 20km/h fúkať v smere našej plavby, potom nebudeme pociťovať na lodi žiadne prúdenie vzduchu.
4. V poslednej modelovej situácii, ktorá je pre jachting najdôležitejšia, bude skutočný vietor fúkať kolmo k pohybujúcej sa lodi. Tu dochádza k zvláštnemu stavu, keď cítime a tiež berieme do plachty tzv. zdanlivý vietor, ktorý vzniká vektorovým súčtom skutočného a pohybového vetra. My ho budeme registrovať v priečnom smere medzi skutočným a pohybovým vetrom.

Z toho vyplýva veľmi dôležitá zákonitosť – smer a veľkosť vetra, ktorý berieme do plachty, sú závislé na rýchlosti a smere ako skutočného vetra, tak aj na rýchlosti a smere našej plavby.



Obr.13 Vznik zdanlivého vetra

3.4 Uhol dryfu

O uhol dryfu sa vlastne zhoršuje plavba plachetnice proti vetru. Splavovaním od návetria stráca plachetnica výšku voči požadovanému kurzu plavby. Dryf závisí nepriamo úmerne od rýchlosti lode, preto sa musíme snažiť dosiahnuť väčšie rýchlosti plavby. Pri malých rýchlostiach totiž laterál vyvodzuje malý vztlak, má malý bočný odpor, plachetnica kľže bokom a viac stráca na výške aj na doprednej rýchlosti. Veľkosť aerodynamickej sily plachty závisí od:

- tlaku zdanlivého vetra na plachtu, ktorý je úmerný jeho rýchlosti a hustote prúdu vzduchu,
- plochy plachty (úmerne jej veľkosti),
- uhla nábehu, čiže uhla nastavenia plachty voči smeru zdanlivého vetra,
- tvaru profilu plachty, jej vydutiu alebo plochosti,
- vlastnosti materiálu plachty,
- uhla náklonu lode,
- vzájomného pôsobenia plachiet,
- spôsobu zavesenia plachty.

Veľkosť aerodynamickej sily je priamo úmerná ploche plachiet, podobne ako výkon motora auta jeho objemu. Čím väčšiu plochu plachiet má plachetnica, tým väčší je jej výkon. Musíme však brať do úvahy aj veľkosť a tiaž lode, ktorú daná výmera plachiet poháňa.

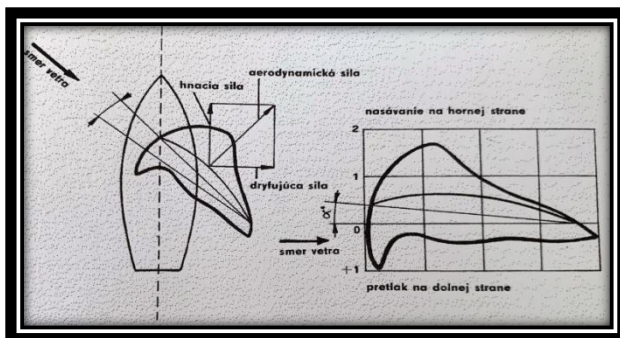
Výkonnosť plachiet rastie s rýchlosťou vetra, preto v slabšom vetre treba plochu plachiet zväčšovať. Naopak, v silnom vetre sa musí zmenšovať.

Uhol nábehu alebo natočenia plachty tvorí plocha plachty so smerom prúdenia vzduchu. Vietor konštantnej sily, ktorý pôsobí na plachtu rovnakého tvaru aj veľkosti, vyvodí rozlične veľkú silu pri rozličných uhloch nábehu. Veľkosť aerodynamickej sily nie je však priamo úmerná uhlu nábehu.

3.5 Profil plachty

Profil plachty je daný jeho vodorovným rezom. Je to krivka s nerovnakým polomerom krivosti, vydutá na záveternú stranu plachty. Jej tvar závisí od strih a zošitia častí plachty. Aby plachta čo najlepšie „ťahala“, musí byť najväčšie vydutie bližšie k sťažňu a naopak, pri zadnom leme musí byť plachta už takmer plochá. Takýto profil zväčšuje tlak v prednej časti plachty, teda tam, kde je to najviac potrebné. Prakticky najväčšie vydutie plachty sa snažíme dosiahnuť v 1/3 dĺžky profilu. Prúdiaci vzduch obteká profil z oboch strán. Na záveternej strane profilu musia prúdnice vzduchu vykonať so zreteľom na vydutie väčšiu dráhu, zhustujú sa a ich rýchlosť sa zvyšuje. Naopak, na náveternej strane profilu prebiehajú prúdnice po kratšej dráhe a ich rýchlosť sa znižuje. Podľa Bernoulliho rovnice nastáva teda nad profilom plachty (na záveternej strane) podtlak, nasávanie. Na náveternej strane profilu sa tlak zväčšuje, vzniká pretlak. Horná strana profilu plachty, rovnako ako profilu krídla lietadla, nazýva sa nasávacou a dolná strana výtlačnou.

Ak nakreslíme priebeh podtlaku a pretlaku okolo profilu plachty do diagramu (obr.14), vyplýva z neho, že nasávanie aj pretlak sú maximálne v prvej tretine dĺžky profilu a klesajú smerom k zadnému lemu plachty. Výsledná vztaková sila F_{vz} je súčtom všetkých jednotlivých síl nasávania a pretlakov. Pôsobisko vztaku je v ťažisku profilu, teda asi v 1/3 dĺžky profilu. Nasávanie sa na výslednom vztaku podieľa asi 66%, je teda dvakrát väčšie ako pretlak na náveternej strane plachty. Vztlak F_{vz} je vždy kolmý na smer ofukovania plachty, teda na smer zdanlivého vetra. Okrem vztaku F_{vz} vzniká na profile odpor F_o , pôsobiaci v smere obtekania kolmo na vztlak. Odpor F_o je brzdiacou silou plachetnice. Nedá sa však celkom zrušiť. Veľkosť odporu F_o závisí od kvality povrchu plachty, od toho, ko sa po ňom kľžu prúdnice vzduchu.



Obr. 14 Priebeh tlaku a podtlaku okolo profilu plachty

4. Slovník jachtárskych výrazov

Dýzový efekt – vytvorenie štrbiny medzi plachtami a ich pôsobenie vo vzájomnej súčinnosti, ktorými sa zvyšuje súčinnosť plachiet a rýchlosť lode.

Laterálna plocha – bočný priemet celej lode, ktorý je zanorený vo vode

Oťaže – laná, ktorými ovládame natočenie plachiet voči vetru

Polárna krivka – ukazuje zmenu veľkosti sily v závislosti na uhle nábehu

Prova – predná časť lode

Sťažeň – predmet slúžiaci na vztýčenie/umiestnenie plachiet na lodi

Rahno – žrd' ktorá vystužuje spodnú hranu hlavnej plachty

Návetrie/závetrie – návetrie je časť lode alebo plachty vystavená vetru, naopak závetrie je časť lode alebo plachty odvrátená od vetra

5. Záver

Popri vynáleze kolesa je plachetnica azda najgeniálnejším dielom ľudského tvorivého ducha, pre to som sa v tejto práci rozhodol priblížiť čitateľovi jachting z fyzikálneho hľadiska. Verím že som obsiahol čo možno najviac fyzikálnych faktorov, ktoré ovplyvňujú plavbu plachetnice.



6. Zoznam použitej literatúry a fotodokumentácie

LITERATÚRA

[1] Bezdíček, J.: Wind surfing

Votobia, 1994

[2] Darton, M.: Napni plachty

INA, spol. s.r.o., Bratislava 1997

[3]Hlavička, A.: Fyzika pre pedagogické fakulty

STN, Praha 1971

FOTODOKUMENTÁCIA

Všetky fotografie boli zhotovené autorom pre túto prácu.