

V. Gimnazija
Klaićeva 1
Zagreb

Konstrukcija i analiza plovila pogonjenog modificiranim Burnsovim parnim strojem

Marija Došlić
Mentor: Marin Lukas

SADRŽAJ

Abstract.....	2.
1. Uvod.....	2.
2. Cilj.....	3.
2. Materijali i metode.....	3.
3.1 Pogonski stroj.....	3.
3.1.1 Cijev.....	3.
3.1.1.1 Namotaji.....	3.
3.1.1.2 Krajevi.....	4.
3.1.3 Zagrijavanje.....	4.
3.1.3.1 Unutarnje.....	4.
3.1.3.2 Vanjsko.....	5.
3.2 Trup broda.....	5.
3.2.1 Svojstva trupova.....	5.
3.2.2 Katamaran.....	5.
3.2.2.1 Nacrt.....	6.
3.2.2.2 Trup.....	6.
3.3 Metode mjerenja.....	7.
3.3.1 Analiza gibanja.....	7.
3.3.1.1 Određivanje otpora plovila bez potiska.....	7.
3.3.2 Istraživanje uzroka potiska.....	8.
3.3.3 Određivanje snage plamenika.....	8.
3.3.4 Održavanje mase konstantnom.....	8.
4. Rezultati i rasprava.....	8.
4.1 Nastanak potiska.....	9.
4.6.1 I. Faza Zagrijavanje.....	9.
4.6.1 II. Faza Ekspanzija.....	9.
4.6.1 III. Faza Kondenzacija.....	9.
4.6.1 IV. Faza povratak vode.....	9.
4.1.5 Objašnjenje pojave impulsa.....	10.
4.2 Analiza gibanja.....	11.
4.2.1 Prijedeni put u vremenu.....	11.
4.2.2 Određivanje koeficijenta hidrodinamičkog otpora.....	11.
4.2.3. Određivanje prosječne sile potiska.....	12.
4.3 Zagrijavanje.....	12.
4.3.1 Snaga.....	13.
4.3.2 Sprečavanje gubitka radijacijom.....	13.
4.4 Izlazne mlaznice.....	13.
4.5 Broj namotaja.....	14.
4.6. Orijentacija namotaja.....	14.
5. Zaključak.....	15.
6. Literatura.....	15.
7. Životopis.....	15.
8. Zahvale.....	16.

Sažetak

Moguće je izgraditi brod pogonjen s jedne strane zagrijanom namotanom bakrenom cijevi, čiji je drugi kraj uronjen u vodu. Voda u namotajima naglo prijeđe u paru i višestruko se proširi. Para na taj način izbacuje vodu, koja stvara potisak i daje plovilu impuls prema naprijed. Takav smo pogonski stroj postavili na vlastitu ploveću konstrukciju. Kroz analizu gibanja broda proučili smo utjecaj sljedećih parametara na brzinu gibanja: broj i položaj namotaja cijevi, snaga zagrijavanja, oblik izlaznih mlaznica i hidrodinamički otpor konstrukcije. Kako bismo potvrdili hipotezu o principu rada tog stroja izveli smo niz statičkih mjerenja koristeći staklene cijevi.

Abstract

It is possible to construct a vessel powered by means of heating one end of a coiled copper tube, whose other end is immersed in water. The water in the coils evaporates suddenly, and expands greatly. The steam pushes water out of the tube, creating propulsion and giving forward momentum to the boat. We placed such an engine on a self-made floating construction. Through the analysis of the motion of the boat we studied the influence of the following parameters on the speed: number and orientation of coils, power of heating, exit jet shape and hydrodynamic resistance of the construction. To confirm our hypothesis on the functioning principle of the engine we conducted a number of static measurements using glass tubes.

1. Uvod

10. listopada 1916. u odvjetničkom uredu E.T. Silviusa C.J. McHugh patentirao je svoj izum, brod pogonjen jednostavnim parnim strojem, pod imenom „*Power Propped Boat*“. Tako je započela povijest igračke danas poznate kao *putt-putt boat*, koja se u međuvremenu proširila po svijetu. Pogon ovog brodića ustvari je modificirani Burnsov parni stroj bez pokretnih dijelova i sačinjava ga samo cijev s komorom koja se grije. Burnsov parni stroj, poznat i kao mlazni parni stroj, uzima vodu na jednom kraju i izbacuje je malo zagrijanu u mlazu na drugom. Kako nema pokretnih dijelova ne troši se uporabom, a koristi se kao pumpa ili mješalica.

2. Cilj rada

Cilj rada je izraditi plovilo vrlo slično popularnoj igrački, poznatoj kao *putt-putt boat*, istražiti principe rada te analizirati korisnost i primjenjivost, služeći se pritom znanjem iz fizike te vještinama konstruiranja.

3. Materijali i metode

U ovom dijelu bit će opisan postupak izrade plovila i metode mjerenja.

3.1 Pogonski stroj

Pogonski stroj je relativno jednostavan. Sastoji se od namotane bakrene cijevi ispunjene vodom, čija su oba kraja uronjena u vodu, a namotaji su izloženi zagrijavanju. Primarno se zagrijava iz unutarnjeg sustava, koji osim sapnice uključuje spremnike s gorivom koji plovilo čine posve nevezanim za vanjski izvor topline. Za potrebe nekih mjerenja korišteno je i vanjsko grijanje.

3.1.1 Cijev

Koristili smo 43 cm dugu bakrenu cijev, unutarnjeg promjera 3 mm i debljine stjenke 1 mm. Bakar se pokazao pogodnim jer dobro podnosi zagrijavanje i dobro provodi toplinu, a i lako se oblikuje. Pri namještanju cijevi na trup broda bilo je važno paziti na paralelnost krajeva cijevi s površinom vode, kako bi se minimalizirala okomita komponenta potiska.

3.1.1.1 Orijentacija namotaja

Ispitana su dva različita položaja namotaja nad plamenom (*sl. 1. i sl. 2.*). Ravnina na kojoj leže krajevi cijevi i dalje je bila paralelna s površinom vode.



sl.1 -plamen grije oba namotaja



sl.2.- plamen grije jedan namotaj

3.1.1.2 Krajevi cijevi

Kako bismo proučili utjecaj oblika završetka cijevi na brzinu broda, koristili smo dva tipa izlaznih mlaznica. Prvi tip je smanjivao površinu udarnog presjeka cijevi dok ga je drugi povećavao (sl.6). Mlaznice su napravljene od tankog savitljivog aluminijskog lima.

Trapezoidni komad lima omotan je oko kraja cijevi, za proširujuću mlaznicu užim, a za sužujuću širim dijelom. Mlaznice su bile iste duljine.

3.1.2 Grijanje

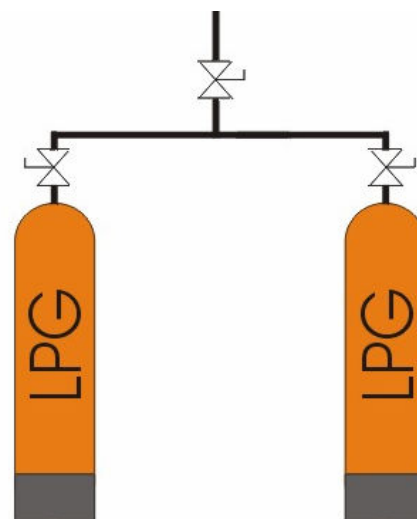
3.1.2.1 Unutarnji sustav zagrijavanja

Unutarnji sustav zagrijavanja koji plovilu omogućuje autonomiju sastavljen je od dva spremnika plina, tri ventila, izlazne sapnice i nekoliko spojnih cijevi. Kao spremnici plina korišteni su spremnici punjivih ručnih upaljača, što je omogućilo jednostavno dopunjavanje goriva. Kako je plin u spremnicima u tekućem stanju, prebrzo ispuštanje uzrokovalo bi trenutno hlađenje, a time i oštećenje dovodnih cijevi. Isto tako, prevelik

protok plina značio bi i gašenje plamena za zagrijavanje.

Kako bi se izbjeglo spomenute probleme na spremnicima

su se nalazili igličasti ventili kojima je protok precizno reguliran. Osim igličastih ventila na dovodu plina postavljen je i jedan kuglasti ventil za trenutno zaustavljanje protoka plina u slučaju gašenja plamena. Čelična sapnica izrađena je od 0.2 mm široke medicinske igle i smještena ispod namotaja tako da plamen zahvaća što širu površinu cijevi. Spremnici plina smješteni su u plovcima ispod spojnice od balze. Autonomija



sl.3.-unutarnji sustav zagrijavanja

sustava bila je zadovoljavajuća jer je na 75% protoka plina samostalno radio oko 15 minuta. Slika sustava vidi se na *sl.3*

3.1.2.2 Vanjski sustav zagrijavanja

Zbog relativno malog raspona snage unutarnjeg sustava, za mjerenje utjecaja jakosti zagrijavanja korišten je vanjski izvor plamena (džepni oksidativni propan-butan plamenik), čiji je maksimalni temperaturni doseg 600 °C.

3.2 Trup broda

3.2.1 Svojstva trupa

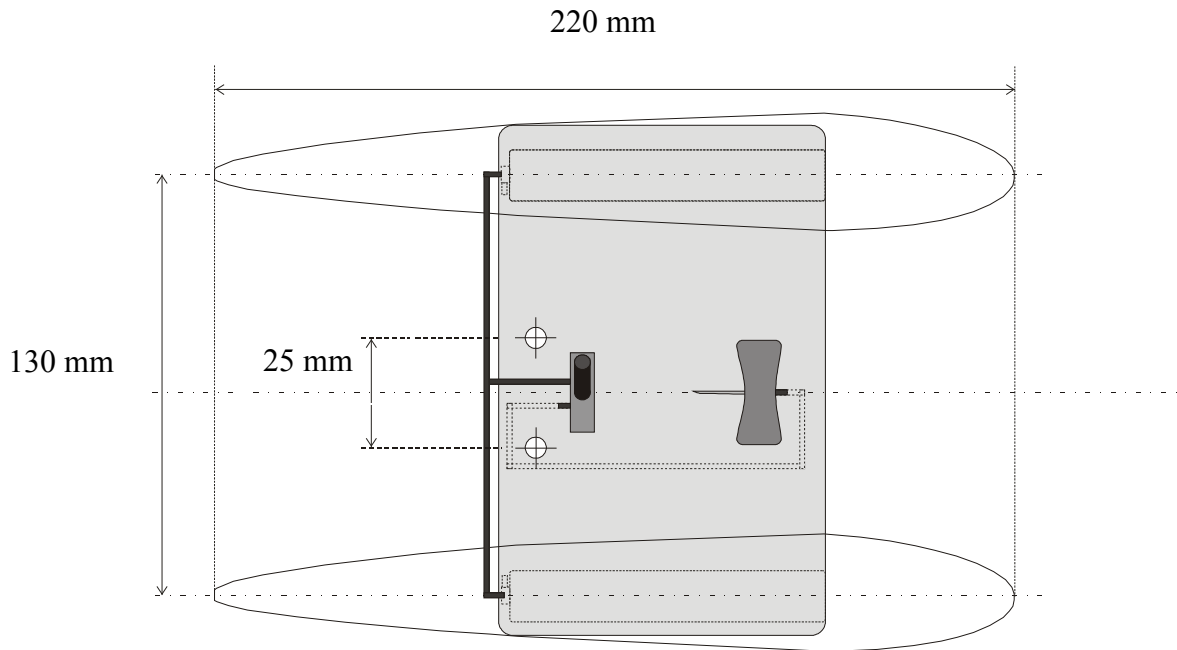
Budući da namotani dio cijevi centar mase pomiče naprijed, a centar potiska je smješten u stražnjem dijelu broda, teško je održavati putanju bez kormilarskih uređaja. Već mali utjecaj sa strane bitno bi promijenio smjer, koji bi onda bilo teško vratiti. Razmotrili smo dva moguća rješenja problema: jednotrupac s kormilom i katamaran.

Jednotrupac s kormilom nije znatno skretao s putanje, ali nije bio stabilan, pa je čak i mala nesimetričnost u raspodjeli mase uzrokovala jako naginjanje plovila. Time mu se povećao otpor i maksimalna dosegnuta brzina bila je manja. Isto tako bilo je teško ukomponirati unutarnji sustav grijanja. Iz svih spomenutih razloga odlučili smo se za katamaran.

3.2.2 Katamaran

Zbog relativno velike mase pogonskog stroja bila je potrebna lagana, a istodobno čvrsta konstrukcija, čija je površina bila dovoljno prostrana za smještanje cijevi i sustava za zagrijavanje. Istovremeno, kako potisak nije jako velik, morali smo minimalizirati uronjeni dio, a time i hidrodinamički otpor. Kao što je već objašnjeno, brod teško održava putanju, a kormilo bi samo dodalo masu. Sve ove karakteristike objedinjene su u našem modelu katamarana.

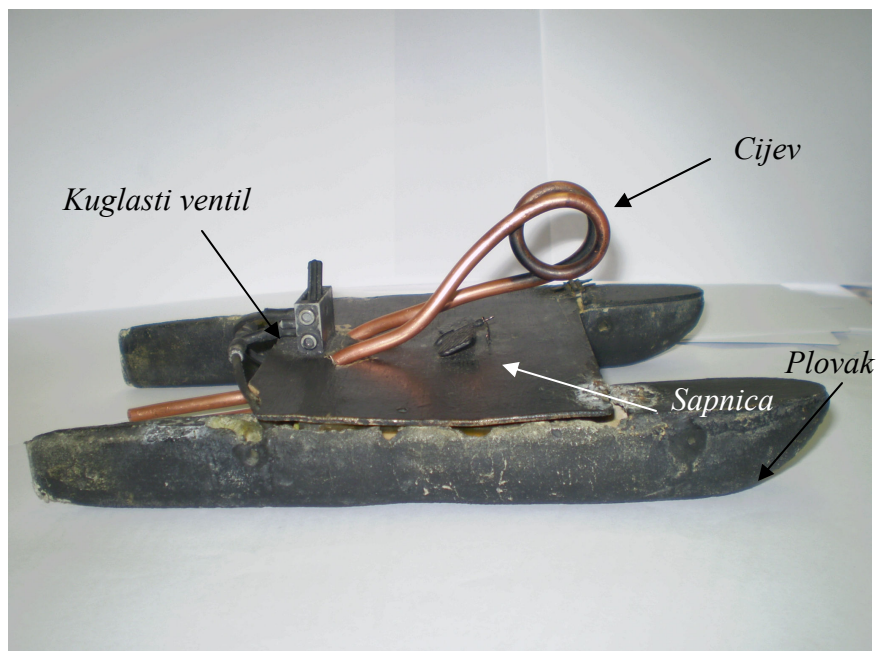
3.2.2.1 Nacrt



sl.4.-nacrt plovila

3.2.2.2 Trup

Tlocrt plovaka katamarana izrezan je užarenom cekas žicom od ekspaniranog polistirena, a dalje su obrađeni ručno. Ekspanirani polistiren (BASF styrodur) se pokazao pogodnim jer je lagan, lak za obradu kako žicom tako i ručno, te relativno otporan na vodu. Slabija mjesta dodatno su ojačana epoksidnom smolom, a radi dodatne zaštite od vode nanesen je impregnacijski sloj grafita. Unutrašnjost plovaka je izdubljena žicom i u njih su smješteni punjivi spremnici plina. Plovci su povezani pomičnom 1,5 mm debelom lakiranom platformom od balze, za koju su pričvršćeni spremnici. Balza je čvrsto drvo, s obzirom na svoju gustoću, tako da je dodatno ojačanje još jednim slojem bilo potrebno samo na mjestu gdje je cijev pogonskog stroja prolazila kroz nju i dodatno je opterećivala. Pokrili smo i gornju stranu trupova kako bismo spriječili mogući ulazak vode izazvan prolazom kroz vodu, a platforma je s tim nepomičnim djelom povezana šarkama, što je olakšalo punjenje spremnika. Masa plovila bez pogonskog stroja bila je 33,5 g.



sl.5.-Ovako je izgledalo gotovo plovilo

3.3. Metode mjerenja

Kako bismo bolje razumjeli princip rada stroja analizirali smo gibanje plovila, utjecaj raznih faktora kao što su zagrijavanje, izlazne mlaznice i drugi na brzinu, mjerili snagu plamena i istražili uzrok potiska.

3.3.1. Analiza gibanja

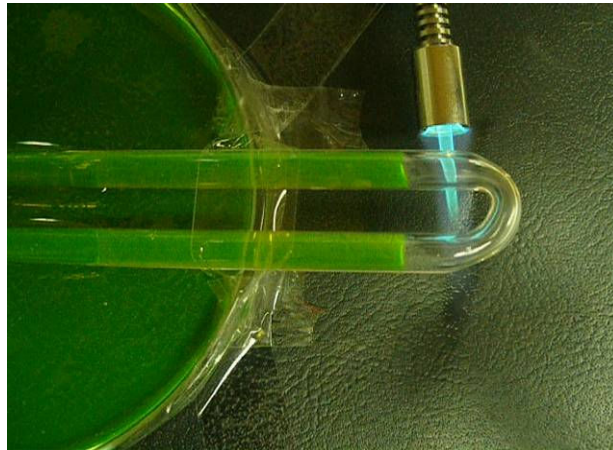
Mjerenja su vršena u 150 cm dugačkoj i 90 cm širokoj kadi na čijem rubu je postavljena traka za mjerenje. Gibanje broda je snimano i dobivene snimke potom su se rastavljale na slike, koje smo obrađivali u programu Sigma Scan. Taj program automatski učitava koordinate označenih točaka, i omogućuje crtanje grafa u programu Sigma Plot. Označavanjem fiksnih točaka, u našem slučaju vrhova plovaka, može se dobiti precizni grafički prikaz pomaka broda, iz čega se zatim mogla izračunati brzina.

3.3.1.1 Određivanje otpora plovila bez potiska

Na isti način mjerili smo i prijedeni put broda bez potiska, iz čega smo izračunali koeficijent hidrodinamičkog otpora trupa. Brod je pušten nekom početnom brzinom i sniman do trenutka zaustavljanja.

3.3.2. Istraživanje uzroka potiska

Kako bismo odredili uzrok potiska koristili smo staklene cijevi ispunjene vodom s malo fluoresceina. Florescein je narančasti prah koji vodi već u malim koncentracijama daje karakterističnu zeleno- žutu boju, ne mijenjajući joj pri tom ostala fizikalno-kemijska svojstva. Postavili smo ih kao pogonsku cijev, i zagrijavali ih oksidativnim plamenom džepnog plamenika. Tako smo mogli jasno vidjeti događaje koji se odvijaju u unutrašnjosti našeg pogonskog stroja. Pomake vidljivog meniska snimali smo kamerom i kasnije analizirali gibanje tekućine u vremenu.



sl.6.- Ovako je izgledalo statičko mjerenje

3.3.3 Određivanje snage plamena

Mijenjajući otvorenost plamenika koji smo koristili za vanjsko zagrijavanje mijenjali smo i protok plina. S obzirom da smo prikazivali odnos brzine i jakosti zagrijavanja bilo je potrebno odrediti snagu plamena, što smo učinili mjereći vrijeme koje je pri toj otvorenosti plamenika bilo potrebno da provrije konstantna masa vode.

3.3.4 Održavanje mase konstantnom

Pri mijenjanju broja namotaja mijenjala se i masa, jer je dužina uronjenog dijela cijevi bila konstantna. Kako bismo to izbjegli razliku mase smo u tom mjerenju nadoknađivali glinom u plovcima. Kako se nije pomicala, glina pri zastajkivanju nije uzrokovala impuls u smjeru prema natrag

4. Rezultati i rasprava

4.1 Nastanak potiska

Kod gibanja broda može se primijetiti da nema ravnomjeran potisak, nego se giba na mahove. Pri tom proizvodi karakterističan zvuk (odatle englesko ime *put-put boat*). Takvo ponašanje uzrokovano je periodičnošću procesa koji se odvijaju u cijevi, i koje možemo podijeliti na četiri faze:

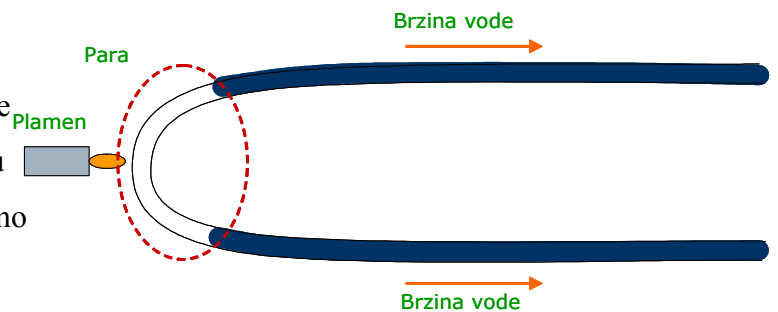
4.1.1 I. Faza - Zagrijavanje

Zagrijavanjem cijevi ispod namotaja voda u njima se zagrijava do temperature vrenja. Kako su krajevi cijevi u vodi, postoji gradijent temperature duž cijevi.



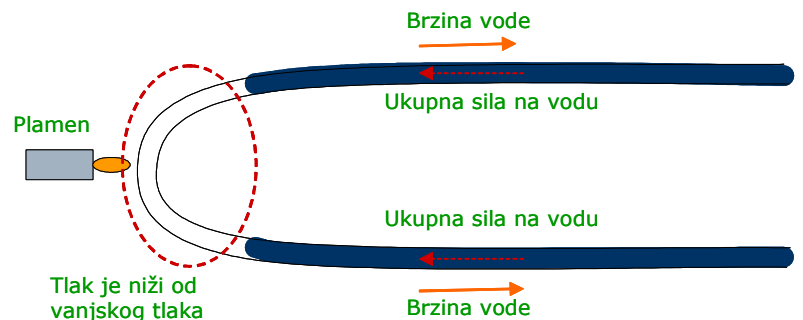
4.1.2 II. Faza – Ekspanzija

Kad voda dosegne temperaturu vrenja prijeđe u paru i naglo se proširi, izbacujući određenu količinu mase i stvarajući potisak. Kako bismo prikazali snagu i eksplozivnost tog procesa primijetimo da para zauzima 1240 puta veći volumen od iste množine vode. U ovoj fazi nastaje i zvuk, uzrokovan eksplozijom u cijevi.



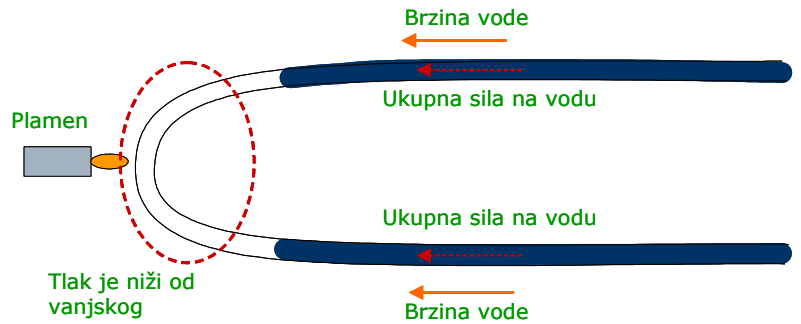
4.1.3 III. Faza - Kondenzacija

Kada se para proširi do hladnijeg dijela cijevi ukapljuje se na stjenkama, a nova para se prestane stvarati.

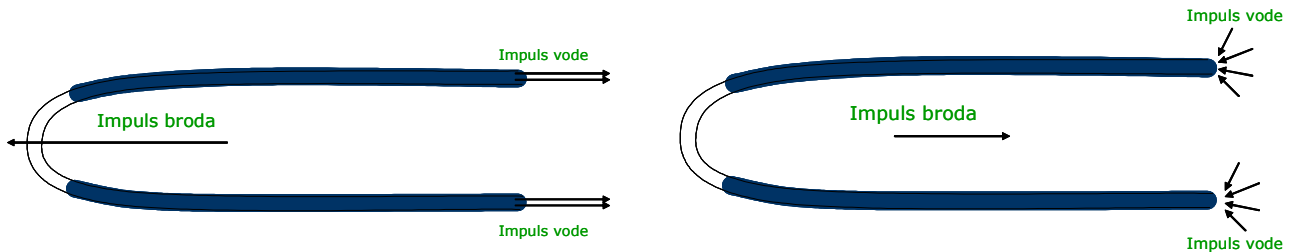


4.1.4 IV. Faza – Povratak vode

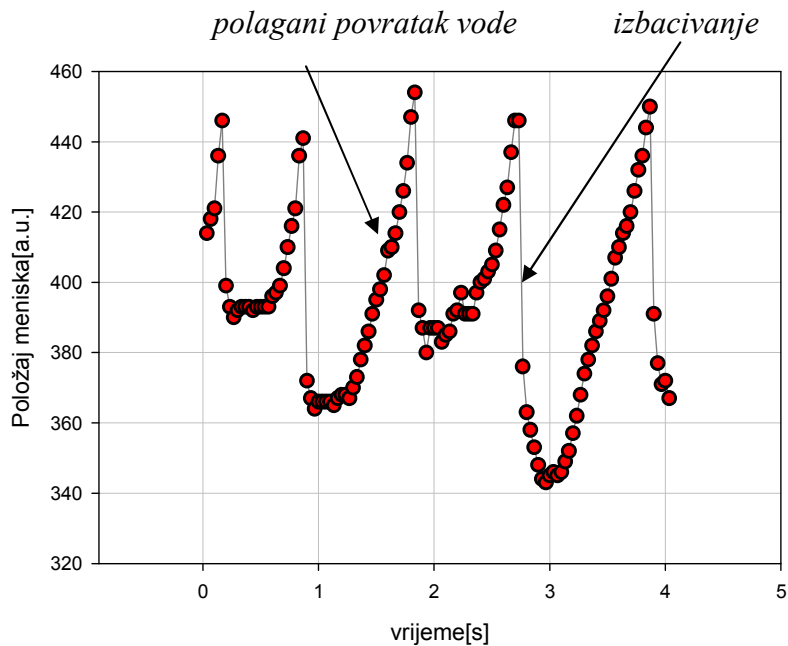
Unatoč prestanku stvaranja pare volumen se nastavlja povećavati jer pogurnuta voda zbog tromosti nastavi izlaziti iz cijevi. U cijevi se stvara podtlak, koji vodu usiše natrag u cijev, malo ohlađenu. Tako se ciklus ponavlja.



4.1.5 Objašnjenje pojave pozitivnog impulsa



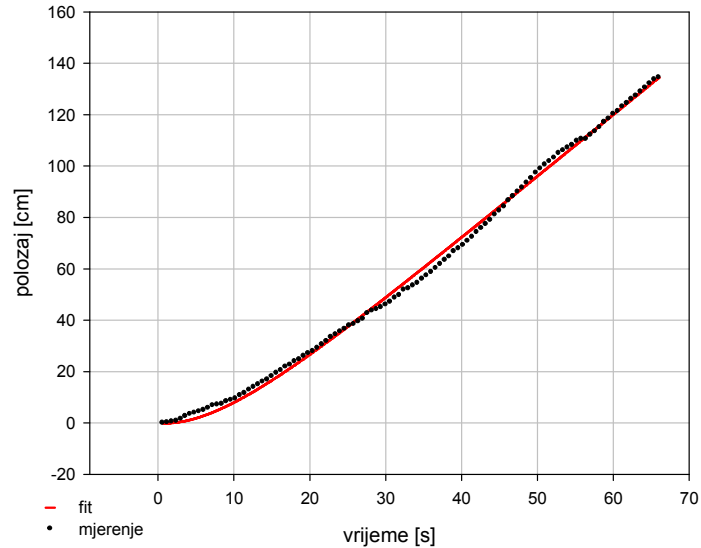
Postavlja se pitanje zašto brod ide naprijed. Po zakonu očuvanja količine gibanja ulazak vode u cijev trebao bi mu dati impuls u suprotnom smjeru i tako spriječiti pomak. Razlog što se to ne događa, i što je gibanje uopće moguće, je taj da se voda sporije vraća nego što izlazi. (graf 1.) Isto tako, pri izlasku je voda skupljena u mlaz, a pri povratku ulazi sa svih strana. Impuls prema natrag također postoji samo je manjeg iznosa.



Graf 1.- ovisnost položaja meniska o vremenu

4.2 Analiza gibanja

4.2.1 Prijedeni put u vremenu



Graf 2.-ovisnost pomaka u vremenu

Vidimo da put u vremenu ne raste jednoliko, zbog toga što potisak dolazi na mahove. Na početku ubrzava, nejednoliko, a kad dosegne određenu brzinu dalje se giba konstantno. Tu pojavu možemo objasniti time da se pri toj brzini potisak izjednačio s hidrodinamičkim otporom (F_r).

4.2.2 Određivanje hidrodinamičkog koeficijenta otpora

S obzirom da za male Reyndolsove brojeve otpor možemo smatrati linearno ovisnim o brzini vrijedi:

$$F_r = \Gamma v \quad [1]$$

gdje je F_r sila otpora, v brzina, a Γ koeficijent otpora.

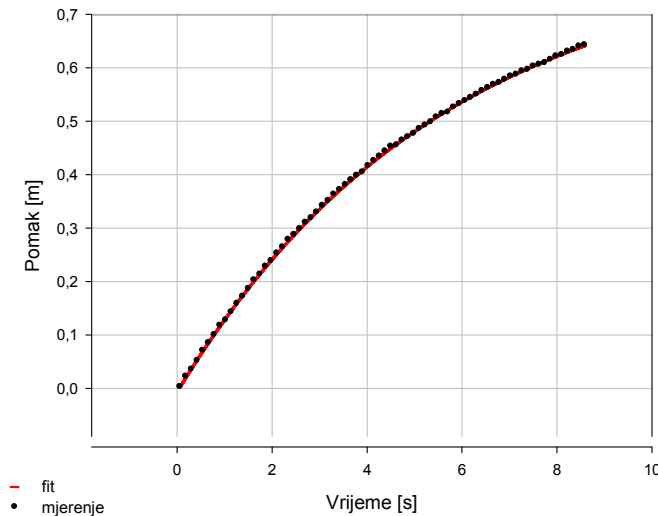
Jednadžba plovila bez potiska glasi:

$$m \frac{dv}{dt} = -\Gamma v \quad [2]$$

gdje je m masa, a t vrijeme.

Iz toga slijedi izraz za pomak u vremenu ($x(t)$)

$$x(t) = v_0 \frac{\Gamma}{m} \left(1 - e^{-\frac{\Gamma}{m} t} \right) \quad [5]$$



Graf 3.- ovisnost pomaka o vremenu- bez pogona

Prilagodбом funkcije gibanja plovila bez pogona (3) na graf (graf 3.) dobivamo da je

$$\Gamma \approx 0.015 \frac{\text{kg}}{\text{s}}$$

4.2.3. Određivanje prosječne sile potiska

Jednadžba gibanja plovila s potiskom, u kojoj je F_p sila potiska:

$$m \frac{dv}{dt} = F_p - F_r \quad [4]$$

Ovisnost brzine o vremenu izrazimo:

$$v(t) = \frac{F_p}{\Gamma} \left(1 - e^{-\frac{\Gamma t}{m}}\right) \quad [5]$$

Integracijom se dobije ovisnost puta ($x(t)$) o vremenu:

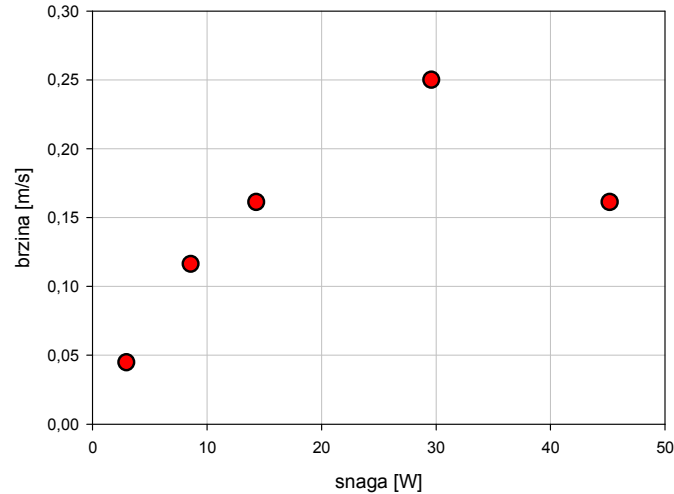
$$x(t) = \frac{F_p}{\Gamma} \left(t + \frac{m}{\Gamma} e^{-\frac{\Gamma t}{m}}\right) \quad [6]$$

Prilagodбом funkcije (6) na graf gibanja plovila (graf 2.) dobijemo: $F_p \approx 0.03\text{N}$

To je prosječna sila potiska

4.3. Zagrijavanje

4.3.1 Snaga plamena

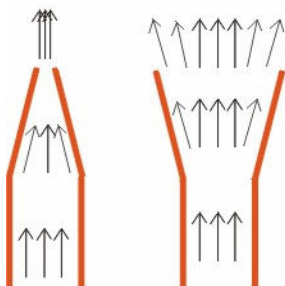


Graf 4.- ovisnost brzine o snazi zagrijavanja

Suprotno očekivanju iz ovog grafa je vidljivo da veća snaga ne znači nužno veću brzinu. Zašto postoji ekstrem? Razumljivo je da se neko vrijeme odnose proporcionalno, jer ekspanzija veće količine vode uzrokuje izlazak veće mase, time i veći potisak. Ipak, ako prevelika količina vode izađe iz cijevi, ostaje premalo mase koja bi uzrokovala podtlak, i zato se ne može dovoljno vode uvući nazad.

4.3.2 Sprječavanje gubitka radijacijom

Kako su snage pri kojima brzina počne padati puno iznad onih koje naš unutarnji sustav zagrijavanja doseže, sprečavanje gubitka radijacijom, koristeći aluminijski pokrov koji se postavi oko namotaja i iznad plamena, povećava brzinu i korisnost. Pri postavljanju pokrova treba pažljivo namjestiti otvor kod plamena, i osigurati dovoljnu količinu kisika.



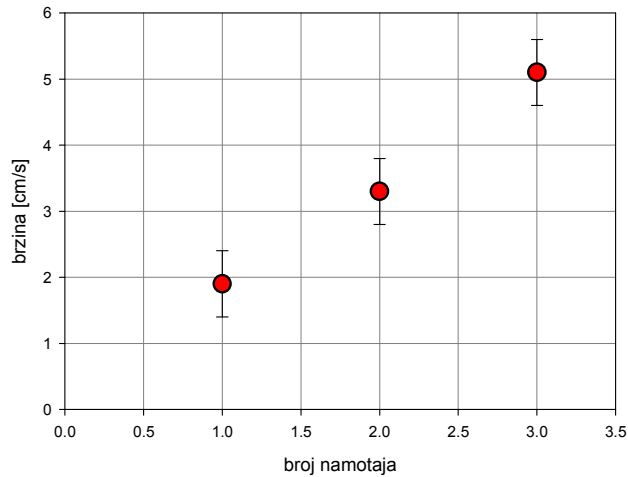
4.4. Izlazne mlaznice

Kako bismo povećali brzinu broda bilo je potrebno minimalizirati impuls u suprotnom smjeru koji je brod dobivao ulaskom vode u cijevi. Otežavanjem ulaska vode i sužavanjem mlaza povećava se brzina broda. Suprotni učinak ostvaren je proširenjem mlaznice, jer je time olakšan

sl. 6. - izlazne mlaznice

povratak vode. Jasan pokazatelj toga, osim različitih brzina, je zakretanje broda ako ima dvije različite mlaznice, u smjeru suprotnom od sužene mlaznice.

4.5. Broj namotaja



Graf 5.- ovisnost brzine o broju namotaja

Vidimo da ako držimo masu konstantnom s povećanjem broja namotaja raste brzina. Pri većem broju namotaja zagrijava se veća masa vode, i uzrokuje veći potisak. Kao i kod rasta snage zagrijavanja, i ovdje vjerojatno postoji ekstrem. Naime, ako se istovremeno zagrije prevelika količina vode, tromost preostale voda neće biti dovoljna da stvori odgovarajući podtlak i uvuče je natrag u cijev. Nažalost nismo to mogli dokazati, jer plovilo nije moglo podnijeti masu većeg broja namotaja.

4.6. Orijentacija namotaja

Učinkovitijim se pokazao položaj u kojem je plamen istovremeno grijao više namotaja (položaj 1. sl.1.) U ovom položaju manje je energije odlazilo u okolinu i plamen je zahvaćao veću površinu cijevi, a time i grijao veću masu vode, što je za te snage pozitivno utjecalo na brzinu i korisnost broda

5. Zaključak

Cilj ovog rada bio je istražiti i analizirati pogonski stroj sastavljen od zagrijane namotane bakrene cijevi čiji su krajevi uronjeni u vodu. Izgradili smo takav stroj i na temelju provedenih mjerenja možemo zaključiti:

- I.** Potisak je uzrokovan parom koja se stvara u namotajima i izbacuje vodu iz cijevi. Aproximacija prosječne potisne sile je $0.03N$.
- II.** Voda se vraća zbog podtlaka koji nastaje kad se para prestane stvarati, a pogurnuta voda zbog tromost nastavi izlaziti iz cijevi.
- III.** Kako raste snaga grijanja brzina do određene vrijednosti raste, a zatim počinje opadati. Istu pojavu predviđamo i kod povećavanja broja namotaja, ako masu držimo konstantnom.
- IV.** Plovilo ima veću brzinu ako se više namotaja grije istovremeno.
- V.** Izlazne mlaznice koje smanjuju presjek cijevi pogoduju većoj brzini plovila, dok one koje ga povećavaju smanjuju brzinu.

S obzirom na broj i vrstu zaključaka smatram da je cilj rada postignut.

6. Literatura

Physics in a toy boat, I. Finnie, R. L. Curl, American Journal of Physics, vol.33, str. 291.-293.

Paić, Mladen; Toplina i termodinamika, Školska knjiga, Zagreb, 1994.

Martin Simons; Model aircraft aerodynamics

www.wikipedia.org

7. Životopis

Rođena sam 26.5.1991. u Zagrebu. Završila sam OŠ Josipa Račića u Zagrebu, a neko vrijeme pohađala sam školu u Berlinu (1997.) i Galvestonu (Teksas, 2004.) Danas sam odlična učenica V. Gimnazije u Zagrebu, matematičkog smjera. Sudjelovala sam na državnim natjecanjima iz ekologije i fizike te na IYPT 2007. u Koreji.

Služim se engleskim, talijanskim i njemačkim jezikom.

8. Zahvale

Zahvaljujem mentoru Marinu Lukasu, profesoru Dariju Mičiću i Damjanu Pelcu, koji su omogućili realizaciju ovog projekta. Isto tako, zahvaljujem svim sudionicima IYPT radne skupine: Luki Božiću, Ivanu Sudiću, Veroniki Sunko i Vilimu Štihu, te svima ostalima koji su pomogli u oblikovanju ovog istraživanja na pomoći i potpori.