

OTPOR BRODA U PLOVNOM KANALU

Miodrag JOVANOVIĆ
Građevinski fakultet - Beograd
mjovanov@eunet.yu

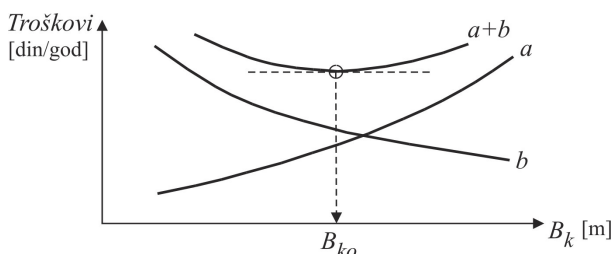
REZIME

U ovom radu se govori o proceni sile otpora kretanju broda u plovnom putu ograničene širine i dubine -- plovnom kanalu. Intenzitet sile otpora se može posredno odrediti na osnovu pogonske snage broda, koja zavisi od dimenzija poprečnog preseka kanala, karakteristika broda i brzine njegovog kretanja, odnosno sniženja nivoa u zoni broda. Sniženje nivoa se pod određenim pretpostavkama može sračunati iz jednačina održanja mase i količine kretanja. Provera računskog modela je obavljena pomoću postojećih rezultata merenja otpora konkretnog teretnog broda tegljenog u plovnom kanalu Savino Selo - Novi Sad. Na kraju je izvršen pokušaj uopštavanja rezultata proračuna.

Ključne reči: otpor broda, plovni kanali

1. UVOD

Termin "otpor broda" označava intenzitet sile koja se suprotstavlja kretanju broda. Mašinski inženjeri izučavaju otpor broda u cilju projektovanja brodova, a inženjeri građevinske struke, u cilju određivanja optimalnih dimenzija plovnih kanala (Slika 1).



Slika 1. Optimalna širina plovnog kanala (B_{ko}) zavisi od troškova izgradnje kanala (a) i eksploatacionih troškova flote (b); ovi drugi obuhvataju troškove goriva, koji su srazmerni pogonskoj snazi broda, odnosno sili otpora.

Otporu broda je posvećeno mnoštvo knjiga i članaka. Pored literature iz opšte hidrodinamike brodova (na primer [1], [7]), postoje publikacije u kojima je opseg razmatranja ograničen na određene tipove brodova i njihove eksploatacione brzine (na primer [3], [5], [11]), zatim radovi koji se bave strujnim poljem u zoni broda i talasima koje brod stvara svojim kretanjem ([2], [10]), kao i radovi koji su posvećeni problemima matematičkog modeliranja otpora broda (na primer [4]). U većini radova se otpori broda razmatraju za slučaj plovidbe u neograničenoj vodenoj sredini, dok se relativno mali broj radova bavi otporima u uslovima ograničene dubine i širine plovnog puta.

Kako raspored normalnih i smičućih napona po okvašenoj površini broda nije poznat, tačnu vrednost sile otpora nije moguće odrediti. Približna vrednost se može proceniti ako se uvede podela ukupnog otpora (R_u) na "otpor trenja" (R_t) i "otpor oblika" ili "preostali otpor" (R_o):

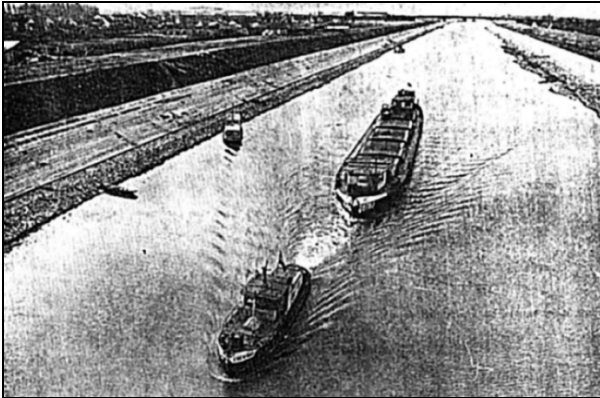
$$R_u = R_t + R_o. \quad (1)$$

Otpori trenja zavise od veličine okvašene površine broskog trupa, njene apsolutne rapavosti i brzine kretanja broda. Otpori oblika obuhvataju otpore usled razlike pritiska na prednjem i zadnjem delu broda i otpore usled talasa koje brod stvara svojim kretanjem (Slika 2).

U praksi se sile na desnoj strani izraza (1) računaju pomoću obrazaca tipa:

$$R = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot C \cdot A \cdot V^\alpha \quad (2)$$

gde su C i α - empirijski koeficijenti, ρ - gustina vode, A - karakteristična površina, a V - karakteristična brzina. Većina empirijskih izraza tipa (2) koji se navode u literaturi nije dimenziono homogena ($\alpha \neq 2$), što ograničava njihovu primenu. U nastavku se izlaže originalni pristup u proceni otpora broda u plovnim kanalima, u "podkritičnoj oblasti" brzina plovidbe.



Slika 2. Plovni kanal Savino Selo - Novi Sad [3]

2. MATEMATIČKI MODEL

Neka brod plovi brzinom V_{pl} u odnosu na obale plovnog kanala koji je shematski prikazan na Slici 3.

Uvode se pretpostavke:

- (i) kanal je prizmatičan, zanemarljivo malog uzdužnog nagiba dna;
- (ii) brod u kanalu miruje, a voda u kanalu teče brzinom koja je u neporemećenom preseku 1-1 jednaka brzini plovidbe: $V_1 = V_{pl}$ (jednoliko tečenje); ukoliko u kanalu već postoji određena brzina toka v_o , u proračunu se koristi relativna brzina: $V_1 = V_{pl} + v_o$, za uzvodnu plovidbu, a $V_1 = V_{pl} - v_o$ za nizvodnu plovidbu.
- (iii) brod je dovoljno udaljen od obala, tako da se njihov uticaj može zanemariti;
- (iv) uzdužna osovina broda je horizontalna;
- (v) poremećaj nivoa u zoni broda aproksimira se kao na Slici 3, pri čemu je sniženje nivoa duž broda svuda isto: $\Delta h = \text{const}$.

Prema konvencionalnom pristupu, hidrauličke promenljive merodavne za procenu otpora broda -- srednja profilna brzina V_s i dubina h_s u suženom preseku S-S prikazanom na Slici 3, mogu se najlakše odrediti rešavanjem sistema jednačina:

$$V_1 \cdot A_1 = V_s \cdot A_s \quad (3)$$

$$h_1 + \frac{V_1^2}{2g} = h_s + \frac{V_s^2}{2g}, \quad (4)$$

od kojih prva predstavlja zakon održanja mase, a druga, zakon održanja energije za idealni fluid.

U radu [8] je pre skoro trideset godina iznet originalna ideja da se otpori oblika (preostali otpori) mogu indirektno odrediti preko efektivne (neto) pogonske snage koja je neophodna da bi se brod kretao brzinom V_1 :

$$P_b = \rho \cdot g \cdot V_1 \cdot A_{pl} \cdot \Delta h \quad [\text{kW}], \quad (5)$$

gde je $A_{pl} = B_{pl} \cdot h_g$ - površina uronjenog preseka broda (Slika 3), $\Delta h = h_1 - h_s$ - sniženje nivoa oko broskog trupa, a g - gravitaciono ubrzanje.

Izraz (5) je intuitivno formulisan po analogiji sa izrazom za snagu pumpe, gde veličina $V_1 \cdot A_{pl}$ predstavlja protok vode koju brod svojim kretanjem potiskuje unazad iz depresije visine Δh .

Preostali otpor je tada:

$$R_o = P_b / V_1 \quad [\text{kN}]. \quad (6)$$

U plovim kanalima su otpori oblika dominantni, a preostali otpor, određen pomoću izraza (6), približno je jednak ukupnom otporu. Iako su poređenja sa nekim merenjima potvrdila održivost navedene pretpostavke [8], ovaj pristup do sada nije šire korišćen u praksi. Međutim, ako se analogija između snage broda i snage pumpe prihvati kao sjajan primer intuitivnog inženjerskog rasuđivanja, može se polazna ideja proširiti u tom smislu da se sniženje nivoa Δh ne vezuje samo za otpore oblika, već za ukupne otpore, uključujući i otpore trenja. Ovakav pristup nalaže da se vrednost Δh što tačnije odredi, pa se umesto računskog modela zasnovanog na jednačini idealnog fluida (4) mora koristiti složeniji model koji bi obuhvatio sve fizičke uticaje.

Brzina povratnog toka. Svojim kretanjem brod izaziva "povratno strujanje" (Slika 3). Ako je v - srednja profilna brzina ovog strujanja, jednačina održanja mase, napisana za presek 1-1 ili bilo koji suženi presek S-S, uključujući presek 2-2:

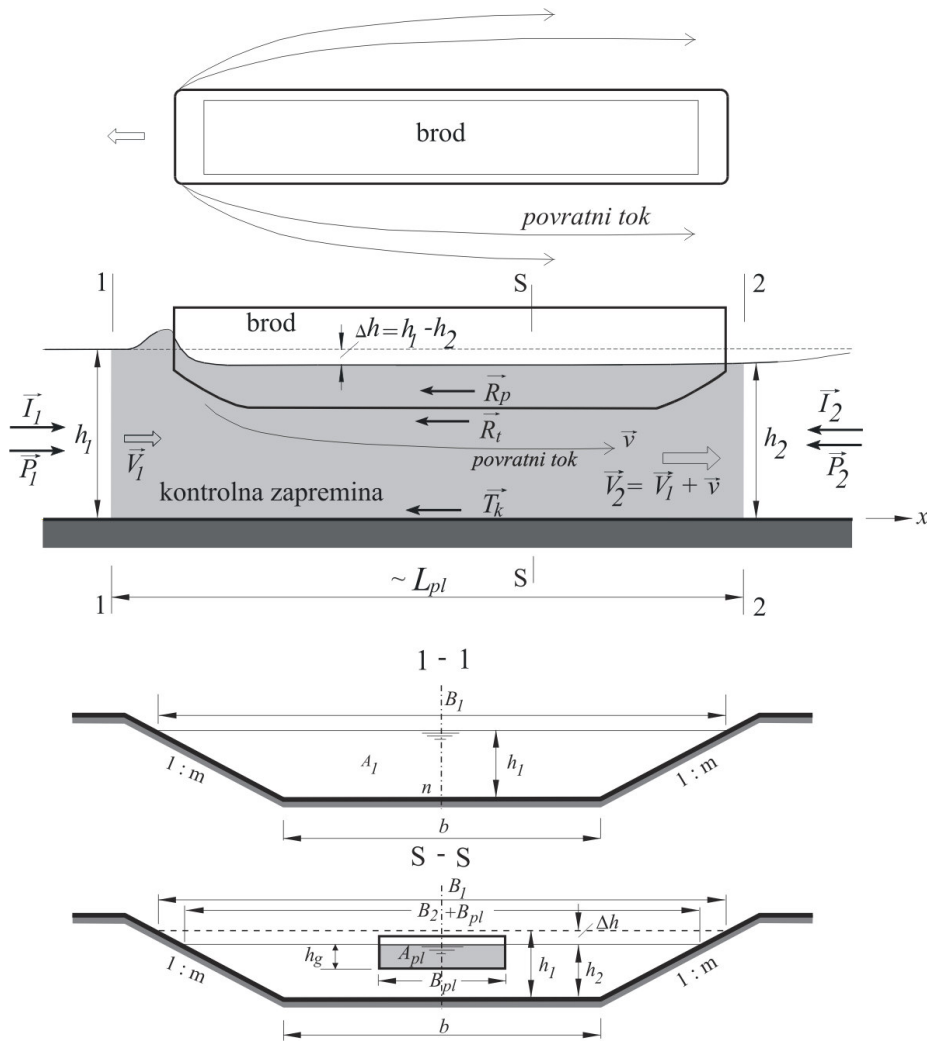
$$V_1 \cdot A_1 = (V_1 + v) \cdot A_2, \quad \text{odnosno}, \quad (7)$$

$$V_1 \cdot (A_1 - A_2) = v \cdot A_2$$

kaže da je protok indukovani kretanjem broda jednak protoku povratnog strujanja. Imajući u vidu da je na osnovu poprečnih profila na Slici 3: $A_1 - A_2 = A_{pl} + \bar{B} \cdot \Delta h$, gde je srednja širina nivoa: $\bar{B} = 0.5(B_1 + B_2 + B_{pl})$, sledi da je srednja brzina povratnog strujanja:

$$v = V_1 \frac{A_{pl} + \bar{B} \cdot \Delta h}{A_2}, \quad (8)$$

dok je srednja profilna brzina u suženom preseku: $V_2 = V_1 + v$.



Slika 3. Uzdužni profil kanala sa kontrolnom zapreminom i poprečni profili merodavni za analizu otpora broda

Brzina kretanja broda V_1 , brzina povratnog strujanja v i sniženje nivoa Δh su uzajamno zavisne veličine; povećanjem brzine V_1 , povećavaju se brzine v i V_2 , kao i veličina Δh , a smanjuje se dubina h_2 . (Teorijski, donja granica ove dubine je kritična dubina).

Bilans sile. Primenjujući D'alambertov princip da se uvođenjem inercijalnih sila dinamički problem svodi na statički problem, može se napisati jednačina ravnoteže sila koje deluju u pravcu strujanja na fluid unutar kontrolne zapremine (Slika 3):

$$I_1 - I_2 + P_1 - P_2 - T_k - R_t - R_o = 0. \quad (9)$$

Pojedinačno, navedene sile se mogu ovako definisati:

- zbir inercijalnih sila: $I_1 - I_2 = \rho \cdot V_1^2 \cdot A_1 - \rho \cdot V_2^2 \cdot A_2$;

- zbir sila pritiska:

$$P_1 - P_2 = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot g \cdot b \cdot (h_1^2 - h_2^2) + \frac{1}{3} \cdot \rho \cdot g \cdot m \cdot (h_1^3 - h_2^3);$$

- sila trenja po okvašenom obimu kanala:

$$T_k = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot C_{\tau k} \cdot (O_2 - B_{pl} - 2 \cdot h_g) \cdot L_{pl} \cdot v^2;$$

- sila trenja po okvašenoj površini trupa broda:

$$R_t = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot C_{\tau b} \cdot \Omega_{pl} \cdot V_2^2;$$

- sila otpora oblika: $R_o = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot C_o \cdot A_{pl} \cdot V_1^2$.

U navedenim izrazima je: b - širina kanala u dnu, m - nagib obalnih kosina, O - okvašeni obim kanala, $C_{\tau k}$ - koeficijent trenja kanala, $C_{\tau b}$ - koeficijent trenja brodske

oplate, Ω_{pl} - površina okvašenog trupa broda, C_o - koeficijent otpora oblika, L_{pl} - dužina broda, B_{pl} - širina broda, a h_g - dubina gaza.

Vrednosti parametara. Kada bi vrednosti parametara C_{tk} , C_{tb} i C_o bile poznate, a pod pretpostavkom da se okvašena površina broskog trupa Ω_{pl} može sračunati (u literaturi [3] se mogu naći obrasci za samohodna plovila, simetrične i asimetrične potisnice), vrednosti nepoznatih v (odnosno V_2) i h_2 (odnosno Δh) mogle bi se odrediti iz jednačina (8) i (9), pa bi se zatim iz jednačina (5), odnosno (6) mogle sračunati vrednosti pogonske snage, odnosno ukupnog otpora broda za zadatu brzinu plovidbe V_1 .

Međutim, vrednosti navedenih parametara ne samo da nisu unapred poznate, već su, zaviseći od nepoznate brzine, deo ukupnog rešenja. To znači da se problem mora rešavati iterativno, uz dopunske uslove koji se navode u nastavku.

Vrednost koeficijenta trenja za kanal se može u svakoj iteraciji računati pomoću usvojene vrednosti Manningovog koeficijenta n :

$$C_{tk} = 2g \cdot n^2 / R_{2k}^{1/3}, \quad (10)$$

gde je: $R_{2k} = A_2 / (O_2 - B_{pl} - 2 \cdot h_g)$.

Vrednosti koeficijenta trenja za brod C_{tb} se u svakoj iteraciji mogu sračunati pomoću dimenzionog homogenog obrasca ITTC (engl. "International Towing Tank Conference") [3], [11]:

$$C_{\tau, itc} = 0.075 (\log \text{Re} - 2)^{-2}, \quad (11)$$

gde je $\text{Re} = V_2 \cdot L_{pl} / \nu$ - Reynoldsov broj, a ν - koeficijent kinematičke viskoznosti [m^2/s].

Računski algoritam

(1) Početna vrednost parametra C_{tk} računa se pomoću izraza (10) pretpostavljajući da je: $A_2 = A_1$ i $O_2 = O_1$. Početna vrednost parametra C_{tb} računa se pomoću izraza (11), u funkciji brzine V_1 . Vrednost parametra C_o se u prvoj iteraciji usvaja na osnovu podataka iz literature (na primer, $C_o = 0.1$).

(2) Za datu brzinu plovidbe V_1 , računaju se intenziteti svih navedenih sila i rešava se sistem jednačina (8) - (9) po nepoznatim veličinama: v (odnosno V_2) i Δh (odnosno h_2). (Mora se koristiti neka od iterativnih metoda za numeričko rešavanje nelinearnih algebarskih jednačina, recimo metoda polovljenja intervala.)

(3) Iz jednačina (5) i (6) računaju se neto pogonska snaga P_b i ukupni otpor R_u .

(4) Računa se nova vrednost preostalog otpora: $R'_o = R_u - R_t$ i utvrđuje razlika sa vrednošću iz prethodne iteracije: $\delta_o = |R'_o - R_o|$.

(5) Ako je razlika δ_o dovoljno mala (na primer, 0.1 kN) i ako je suma sila (9) bliska nuli ($\pm 1 \times 10^{-3}$), iterativni postupak se obustavlja i tekuće vrednosti predstavljaju konačno rešenje.

(6) Ako prethodni uslovi nisu zadovoljeni, koriguju se vrednosti parametara C_{tk} i C_{tb} shodno poslednjim sračunatim vrednostima brzine i dubine u suženom preseku (2-2), dok se vrednost parametra C_o koriguje pomoću izraza: $C'_o = R'_o / (\rho \cdot A_{pl} \cdot V_1^2 / 2)$. Račun se vraća na korak (2), čime započinje sledeća iteracija.

Rezultati proračuna pokazuju da se već nakon 1-2 iteracije, vrednosti parametara C_{tk} i C_{tb} neznatno menjaju - postaju "konstantne", tako da se u iteracionom ciklusu praktično koriguju samo vrednosti parametra C_o i odgovarajuće sile $R_o = R_u - R_t$.

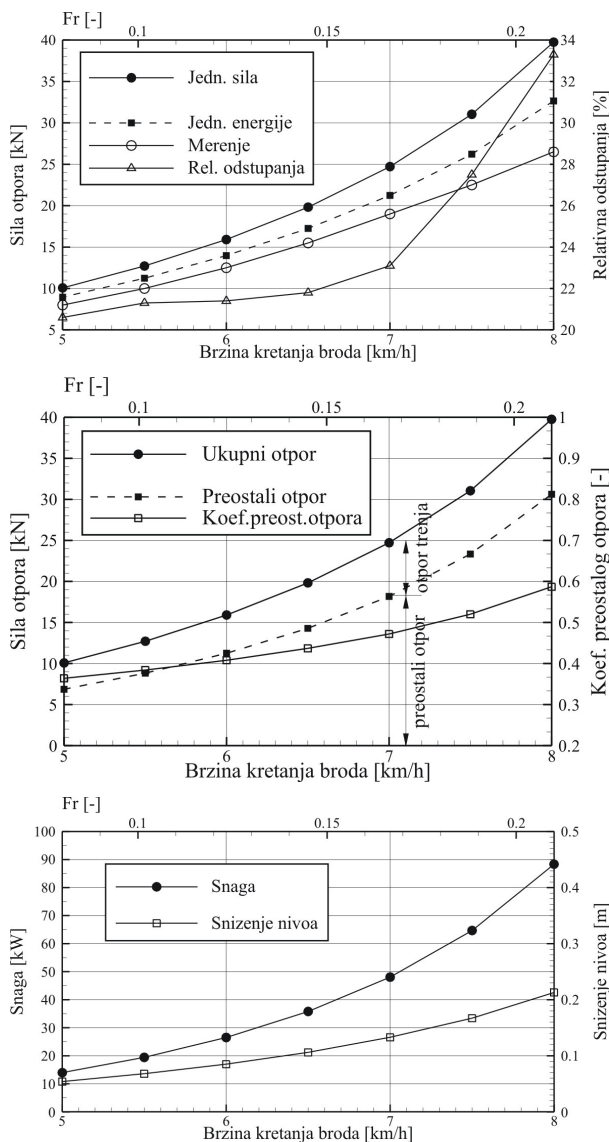
3. PROVERA MODELA

Provera računskog modela obavljena je na osnovu postojećih merenja otpora teretnjaka „JRB-21017” dimenzija $L_{pl}/B_{pl}/h_g = 72/10/2.1$ m u plovnom kanalu Savino Selo - Novi Sad [3]. Dimenzije kanala su: širina u dnu 29 m, širina vodnog ogledala 47 m, dubina 3 m, nagib kosina 1:3 (Slika 2). U trenutku merenja nosivost teretnjaka je iznosila 940 t, a gaz 1.9 m, tako da je vrednost "koeficijenta plovnosti" $A_1/A_{pl} = 6.23$. Ispitivanja su obavljena pri brzinama tegljenja 5-8.5 km/h. Rezultati proračuna i njihovo poređenje sa rezultatima merenja prikazani su na Slici 4.

Može se konstatovati da se primenom analogije sa pumpom u datom slučaju dobijaju nešto veći otpori od izmerenih otpora, bez obzira da li se koristi konvencionalni pristup ili predloženi postupak. Za brzine plovidbe manje od 7.5 km/h, razlike između rezultata proračuna i merenja ne prelaze 20%. Kod brzina plovidbe većih od 8 km/h razlike u rezultatima postaju značajne.

Podešavanjem vrednosti nekih parametara računskog modela moglo se postići bolje slaganje rezultata, ali se tome nije težilo, s obzirom da nije poznata greška merenja, niti su u publikaciji [3] definisani svi uslovi

pod kojima su ta merenja obavljena (osnovna brzina toka u kanalu i smer plovidbe).

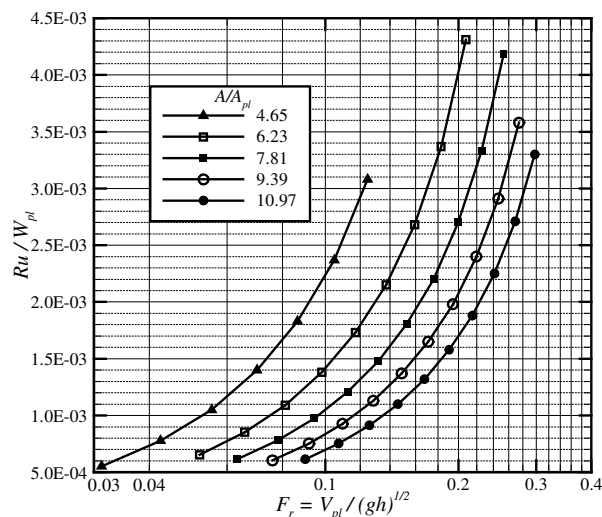


Slika 4. Rezultati proračuna otpora teretnjaka "JRB-21017" u plovnom kanalu Savino Selo - Novi Sad (Fr broj odgovara preseku 1-1 uzvodno od broda).

4. UOPŠTAVANJE REZULTATA

Uopštavanjem rezultata proračuna dobijen je dijagram na Slici 5. Zavisnost otpora broda (izraženog u bezdimenzionom obliku, u odnosu na težinski deplasman broda: R_t/W_{pl}) i Frudovog broja (izraženog

preko brzine kretanja broda i dubine u kanalu: $Fr = V_{pl}/\sqrt{gh}$) prikazana je u funkciji ograničenosti plovnog gabarita, izražene preko "koeficijenta plovnosti" (odnosa površina poprečnog preseka kanala i uronjenog dela broda: A/A_{pl}).



Slika 5. Opšta zavisnost otpora broda u plovnim kanalima

Dijagram potvrđuje poznatu činjenicu da otpori broda opadaju sa povećanjem poprečnog preseka plovnog kanala. Primenjeni računski model omogućava da taj zaključak kvantitativno iskaže, pokazujući da se za opseg vrednosti $A/A_{pl} = 5-11$ najveće vrednosti Frudovog broja nalaze u rasponu od 0.12 do 0.3. Praktična korist prikazane bezdimenzionih zavisnosti je u tome što može pomoći projektantima plovnih kanala da relativno brzo valorizuju više varijanti plovnog kanala u cilju određivanja tehnički i ekonomski optimalnog rešenja.

5. ZAKLJUČAK

Analogija između snage pumpe i pogonske snage broda daje mogućnost relativno lake i pouzdane procene otpora broda u plovnom putu ograničene širine i dubine. Postupak zasnovan na iterativnom rešavanju jednačine ravnoteže sila uzima u obzir bitne fizičke uticaje na brod u toku njegovog kretanja u ograničenoj vodenoj sredini. U tom smislu, predložena metoda ima suštinske prednosti u odnosu na konvencionalne empirijske metode.

LITERATURA

- [1] Basin, A.M., Velednicki, I.O, Lahovicki, A.G., *Gidrodinamika Sudov*, Sudostroenie, 1976.
- [2] Bhowmik, G.N., Xia, R., Mazumder, S.,B., Soong T., W., "Return Flow in Rivers due to Navigation Traffic", *J. of Hydraulic Eng., ASCE*, Vol. 121, No. 12, Dec. 1995.
- [3] Čolić, V., *Eksperimentalna ispitivanja veličine otpora pri plovidbi savremenih brodova dunavske plovne mreže i određivanje najpovoljnijih računskih metoda na osnovu rezultata ispitivanja*, Saobraćajni fakultet Beograd, 1993.
- [4] Grilli, S.T., "Wave Motion and Overturning Induced by Moving Bodies: Application to Slender Ship Wave Resistance", *Computational Modelling of Free And Moving Boundary Problems – Vol. 1 Fluid Flow*, ed. Wrobel, L.C., Brebbia, C.A., Computational Mechanics Publications de Gruyter, Berlin, 1991.
- [5] Hofman, M., Radojčić, D., *Otpor i propulzija brzih brodova u plitkoj vodi*, Mašinski fakultet, Beograd, 1997.
- [6] Jovanović, M., "Otpor broda u plovnom putu ograničene širine i dubine", XIII. Savetovanje Jugoslovenskog društva za hidraulička istraživanja, Soko Banja, 2002.
- [7] Lewis, E.V. ed. *Principles of Naval Architecture*, Vol. II: Resistance, Propulsion and Vibration, SNAME, 1988.
- [8] McNown, J.S., "Sinkage and Resistance for Ships in Channels", *Journal of the Waterways and Harbours Division, ASCE*, Vol. 102, No. WW3, Aug. 1975.
- [9] Schofield, B., "Speed of Ships in Restricted Navigation Channels", *J. of the Waterways, Harbors, and Coastal Eng. Division, ASCE*, Vol. 100, No. WW2, May 1974.
- [10] Sorensen, R.M., "Waves Generated by Model Ship Hull", *Journal of the Waterways and Harbours Division, ASCE*, Vol. 95, No. WW4, Nov. 1969.
- [11] Van de Kaa, E.J., "Power and Speed of Push-tows in Canals", *Symposium on Aspects of Navigability of Constraint Waterways, Including Harbour Entrances*, Delft, 1978.

SHIP RESISTANCE IN NAVIGABLE CANALS

by

Miodrag JOVANOVIĆ
Faculty of Civil Engineering
mjovanov@eunet.yu

Summary

This paper deals with resistance to the motion of ships in fairways of limited breadth and depth - navigable canals. The intensity of the resistance force can be indirectly estimated from the ship power, which depends on the cross-section size, characteristics of the ship, its speed, and the induced sinkage of the ship. Under certain assumptions, the sinkage may be calculated considering the balance of forces, as

illustrated by an example. The numerical model is verified by existing resistance measurements performed for a particular barge towed in the navigable canal Savino Selo - Novi Sad. Finally, an attempt is made to generalize the results of calculation.

Key words: ship resistance, navigable canals

Redigovano 14.06.2004.