

Milan Čuvalo *

YU ISSN 0469-6255
NAŠE MORE 38 (1-2)59(1991)

DINAMIČKI EFEKTI SRAZA U OSNIVANJU BRODA

UDK 629.12:532

Izvorni znanstveni rad

Sažetak

U radu je izložena jedna praktična metoda za određivanje značajki sraza i efekata na brodsku konstrukciju. Analiziran je utjecaj oblika pramčanih rebara na efekte sraza te je data metodologija određivanja faktora forme, kao jednog od utjecajnih faktora u problematici sraza. Pored faktora forme rebara, razmatrana je vjerojatnost pojave sraza, broj srazova u jedinici vremena, vremenski razmak između sukcesivnih srazova, najvjerojatniji najveći tlak, najveći tlak za projektne uvjete u zadanim okolišnim uvjetima. Povećanje tlaka na oplatu dna, kao posljedica sraza, može uzrokovati trajne deformacije limova dna. Izvodi se pojam održive brzine u realnim uvjetima valovlja, s obzirom na dopušteni tlak na oplatu, što definira dva područja brzina plovidbe: područje sigurno (99%) od oštećenja i područje brzina u kojem je moguće očekivati plastične deformacije limova dna. Metoda je prikladna za korištenje u fazi osnivanja broda, točnije, definiranja forme pramčanog dijela broda. Podrazumijeva se da posjedujemo alat za određivanje gibanja broda u vertikalnoj ravnini na nepravilnom valovlju, što je preduvjet za kvantificiranje elemenata sraza.

DYNAMICAL EFFECTS OF SLAMMING FOR SHIP DESIGN

Summary

In this paper is presented a practical method to predict slamming characteristics and effects to ship's construction. The influence of forebody frames shape is analysed as well as the methodology of determining the impact form factor. The prediction includes: probability of slam impact, number of slam impacts per unit time, time interval between slam impacts, the largest impact - pressure most likely to occur, the extreme pressure for design consideration in a seaway. Increase of pressure on bottom plates, as a slamming effect, may cause plastic deformations of bottom plates. Sustained ship's speed relating to allowable pressure on bottom plates and two parts of ship's speed range: range free from damage (99%) and range damage most likely to occur, are considered. This method is favourable at an early design stage. It is supposed that ship's motions in vertical plane at irregular waves are known, as a necessary condition to predict slamming characteristics.

UVOD

U realnim uvjetima plovidbe na valovlju, posebice pri manjem gazu na pramcu (npr. plovidba u balastu), pri određenim okolišnim uvjetima, doći će do pojave sraza (slamming). Problem postaje posebno naglašen radi li se o manjem brodu kao što je: ribarski brod, izletnički, putnički, ratni brod itd. Ni veliki brodovi nisu potpuno imuni od ove pojave, plove li u uvjetima teških stanja mora pri dovoljno malom gazu na pramcu.

Razlozi koji prisiljavaju projektante da se ovom problematikom zabave još u najranijem stadiju osnivanja broda, su dinamički efekti sraza, a manifestiraju se kao:

- dodatni tlak na limove dna kao posljedica, deformacija istih;
 - dodatna naprezanja u strukturi broda;
 - vibracije trupa;
 - naglo usporavanje gibanja pramca broda u vertikalnoj ravnini što ima za posljedicu nelagodu za posadu i putnike, oštećenje tereta ili opreme, pomicanje tereta itd.
- Za nastajanje ove pojave bitna su tri čimbenika:
- izranjanje dna pramca kao nužni uvjet nastajanja pojave;
 - fazna razlika između gibanja vala i gibanja pramca broda u vertikalnoj ravnini. Najkritičnije stanje je u slučaju suprotnih faza, tj. kada se pramac giba prema dolje, a val prema gore;
 - amplituda relativne brzine gibanja pramca u vert.ravnini. Kod neke, dovoljno velike, brzine gibanja pramca u vert.ravnini bit će ispunjen uvjet za nastajanje sraza. To je kritična brzina gibanja pramca u vert.ravnini.

VJEROJATNOST POJAVE SRAZA

Za nastajanje sraza, kako je već rečeno, nužno je da budu ispunjena dva uvjeta:

- da dođe do izranjanja pramca i
- da vertikalna relativna brzina gibanja pramca premaši kritičnu brzinu v_0 .

Vjerojatnost izranjanja dna pramca broda funkcija je gaza broda na pramcu i amplitude relativnog gibanja pramca u vertikalnoj ravnini na valovlju:

$$P(\text{izranjanje pramca}) = \text{EXP}(-T^2/2 m_{os})$$

T - gaz broda na promatranom presjeku
 m_{os} - površina ispod spektra relativnog pomaka presjeka u vert.ravnini

S druge strane, vjerojatnost da amplituda relativne vertikalne brzine gibanja presjeka premaši kritičnu brzi-

* dr Milan Čuvalo
Fakultet strojarstva i brodogradnje Sveučilišta u Zagrebu
Zagreb

nu v_0 je:

$$P(RV > v_0) = \text{EXP}(-v_0/2 m_{ov})$$

v_0 - kritična brzina gibanja presjeka u vert.ravnini
 m_{ov} - površina ispod spektra relativne vert.brzine gibanja presjeka

Iz gornja dva izraza vidljivo je da je, za proračun i kvantificiranje značajki sraza potrebno prethodno provesti proračun gibanja broda na valovlju. Za određivanje veličina m_{os} i m_{ov} nužno je provesti proračun spregnutih gibanja poniranja i posrtanja na pravilnim valovima kako bi dobili amplitudne operatore. Izborom spektra valovlja koji definira stanje okoliša (valovlja), uz prethodno određene amplitudne operatore, bit će definirani i spektri odziva pomaka i brzine u vertikalnoj ravnini:

$$S_{rm} = S \zeta(\omega_e)(RAO)_{rm};$$

$$S_{rv} = S \zeta(\omega_e)(RAO)_{rv}$$

Integracijom odgovarajućih spektara odziva odredit će se veličine m_{os} i m_{ov} . Pretpostavimo li da su pojave izranjanja pramca i relativna vertikalna brzina gibanja pramca statistički neovisne slučajne varijable, vjerojatnost pojave sraza bit će produkt vjerojatnosti pojave jedne i druge varijable:

$$P(\text{sraz}) = \text{EXP}(-T^2/2 m_{os} + v_0^2/2 m_{ov})$$

Učestalost pojavljivanja sraza u jedinici vremena može se izraziti na slijedeći način:

$$N_s = 1/2\pi (m_{ov}/m_{os})^{1/2} P(\text{sraz}) - \text{broj srazova u sekundi}$$

$$N_t = 3600 N_s \tau - \text{ukupan broj srazova u vremenu } \tau$$

$$\tau - \text{vrijeme plovidbe u zadanim okolišnim uvjetima}$$

Kritičnu brzinu relativnog vert.gibanja presjeka, brzinu čijim prekoračenjem će doći do sraza (ako su ispunjeni nužni uvjeti) možemo odrediti približno iz slijedećeg izraza:

$$v_0 = 12 \lambda^{1/2} \quad \lambda = L/520$$

L - duljina broda

VREMENSKI INTERVAL IZMEĐU DVA SRAZA

Vjerojatnost da vremenski razmak između dva sukcesivna sraza bude veći ili jednak nekom određenom vremenu t_0 je:

$$P(t > t_0) = \text{EXP}(-N_s(T_p - t_0))$$

T_p - vlastita priroda posrtanja

$$T_p = 2\pi (I_{yy} + A)^{1/2} / (\Delta M_{LG})^{1/2}$$

M_{LG} - uzdužna metacentarska visina

A - moment tromosti pridružene mase vode

I_{yy} - moment tromosti mase broda oko osi y

PREDVIĐANJE TLAKOVA OD SRAZA

Teoretska razmatranja efekata uranjanja i izranjanja nekog presjeka broda ovdje nisu provedena. Iskorišten je bitni zaključak takvih razmatranja da je tlak od sraza proporcionalan kvadratu relativne vertikalne brzine gibanja presjeka u trenutku sraza:

$$p = 0,5 \rho k_1 z_x^2$$

k_1 - koeficijent oblika donjeg dijela presjeka broda

z_x - relativna vertikalna brzina gibanja u trenutku sraza na presjeku x

Provedena ispitivanja su pokazala da koeficijent oblika presjeka k_1 nije funkcija brzine broda niti okolišnih uvjeta nego samo oblika donjeg dijela presjeka broda.

Budući amplituda relativne vertikalne brzine gibanja presjeka slijedi Rayleigh-ev zakon distribucije, tlak sraza ima slijedeću funkciju vjerojatnosti:

$$f(p) = \chi \text{EXP}(-\chi(p - p_0))$$

$$p_0 < p <$$

p - slučajna varijabla tlaka

$$p_0 = 0,5 \rho k_1 v_0^2 \quad - \text{kritič na vrijednost tlaka}$$

$$\chi = 1 / \rho k_1 m_{ov}$$

Usporedba teoretske funkcije vjerojatnosti i historiograma dobivenih modelskim ispitivanjima pokazuje dobru podudarnost (14). Iz funkcije vjerojatnosti mogu se dobiti statističke veličine tlaka od sraza:

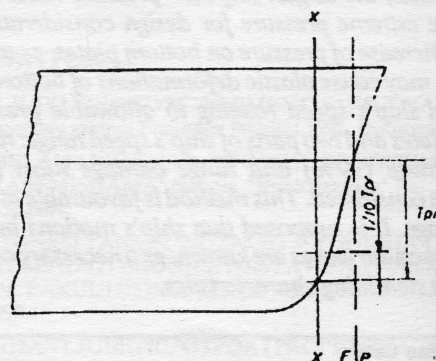
$$p_{av} = 0,5 \rho k_1 (v_0^2 + 2 m_{ov}) - \text{prosječ ni tlak}$$

$$p_{1/3} = 0,5 \rho k_1 (v_0^2 + 4,2 m_{ov}) - \text{značajna veličina tlaka}$$

Prema gornjem obrascu moguće je procijeniti statističke veličine tlaka sraza za razne brzine broda i razna stanja mora. Nužno je poznavati vrijednost faktora k_1 za svaki presjek broda. Ako ne raspoložemo modelskim ispitivanjima, k_1 možemo odrediti pomoću regresione jednadžbe:

$$k_1 = \text{EXP}(1,337 + 2,419 a_1 - 0,873 a_3 + 9,624 a_5)$$

Nepoznati koeficijenti regresione jednadžbe određuju se komformnim preslikavanjem donjeg dijela rebra.



Sl.1. Definicija projektne gaza za sraz

Za presjek broda, za koji tražimo tlakove sruza, treba pripremiti slijedeće:

- projektni gaz definiran prema slici 1.
- odabrati 1/10 TPR
- podijeliti rebro na deset dijelova između $z = 1/10$ TPR i osnovke broda ako je y za $z = 0$ veći od nule, odnosno između $z = 1/10$ TPR i $z = z_1$ za koji je $y = 0$

- očitati poluširine rebra za jedanaest formiranih presjeka (iduci od 1/10 TPR prema osnovki broda)

Jednadžba komformnog preslikavanja:

$$w_1 x^2 + w_2 x^4 + w_3 x^3 + w_4 x^5 + w_5 x + w_6 = 0$$

$$b = y(1)$$

$$\lambda = T_{pr}/b \quad \text{za } a_1, a_3, a_5 \leq 1$$

$$T_{11} = b^2(1 - \lambda + \lambda^2)$$

$$T_{12} = b(1 - \lambda)$$

$$T_{13} = -3b(1 + \lambda)$$

$$T_{14} = (A + T_{11})/T_{12}$$

$$T_{15} = T_{13}/T_{12}$$

$$T_{16} = 2/T_{12}$$

$$A = 2A'/\pi \quad - A' \text{ je površina do } 1/10 T_{pr}$$

$$C = 8M/\pi \quad - M \text{ je moment inercije površine } A' \text{ oko osi kroz } 1/10 T_{pr}$$

$$D_1 = \lambda^2 + 4\lambda - 7$$

$$D_2 = -\lambda^3 + \lambda^2 - 3\lambda + 3$$

$$D_3 = -\lambda + 5$$

$$D_4 = \lambda^3 + \lambda^2 + 3\lambda + 3$$

$$D_5 = -\lambda - 9\lambda - 12$$

$$D_6 = 3\lambda + 7$$

$$D_7 = -1.75\lambda^4 - 0.5\lambda^3 - \lambda^2 - 1.5\lambda - 1.25$$

$$w_1 = -4T_{16}$$

$$w_2 = 2bT_{14}D_5 - 4T_{15} - 6$$

$$w_3 = b(D_4 + T_{15}D_3 + bT_{16}D_1) - 4T_{14}$$

$$w_4 = b(2T_{14}D_3 + b(D_5 + T_{15}D_1 + 0.5bT_{16}D_2))$$

$$w_5 = b^2(T_{14}D_1 + 0.5b(3D_4 + T_{15}D_2))$$

$$w_6 = 0.5b^3(T_{14}D_2 + bD_7) - C$$

Rješenjem jednadžbe komformnog preslikavanja dobivamo vrijednost za x :

$$\alpha = 2x/b \quad \text{za } x \text{ veći od } 0$$

$$a_5 = T_{k4}/x + T_{k5} + T_{k6} x$$

$$a_3 = (1 + \lambda)/\alpha - 1$$

$$a_1 = (1 - \lambda)/\alpha - a_5$$

Uvrštavajući dobivene koeficijente u regresionu jednadžbu dobit ćemo faktor k_1 . Postupak određivanja faktora forme k_1 programiran je za elektroničko računalo. Rebro za koje tražimo k_1 zadaje se sa nekoliko očitavanja. Pomoću splinea definiramo njegov matematički oblik iz kojeg dobijemo jedanaest traženih presjeka za interval od 1/10 TPR. Time su određeni svi potrebni elementi za kvantificiranje statističkih veličina tlaka.

Za potrebe projektiranja, korisno je poznavati najveći tlak koji će se pojaviti u n srazova. Funkcija gustoće vjerojatnosti za p_n je:

$$f(p_n) = [nf(p) \{F(p)^{n-1}\}]_{p=p_n} = n \chi \text{ EXP}[-\chi(p_n - p_0)] \{1 - \text{EXP}[-\chi(p_n - p_0)]\}^{n-1}$$

$$F(p) = \int f(p) dp$$

Maksimum funkcije je:

$$df(p_n)/dp_n = 0$$

$$p_n = p_0 + 1/\chi \ln(n) = 1/2 \rho k_1 [v_0^2 + 2m_{ov} \ln(n)]$$

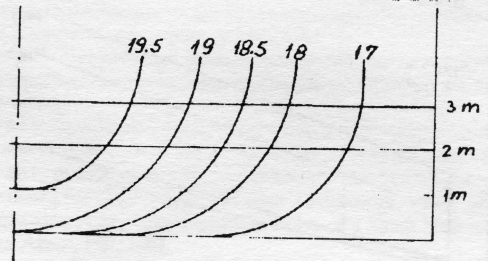
U praksi se, redovito, ne koristi maksimalna vrijednost tlaka nego se definira maksimalni tlak uz određenu vjerojatnost premasivanja:

$$p(\alpha) = 0,5 \rho k_1 \{v_0^2 - m_{ov} \ln[1 - (1 - \alpha)^{1/n}]\}$$

α - zadana vrijednost premasivanja. Zadaje se obično $\alpha = 0,01$, što znači da je vjerojatnost 99% da se, u zadanim uvjetima plovidbe, neće pojaviti tlak veći od $p(\alpha)$.

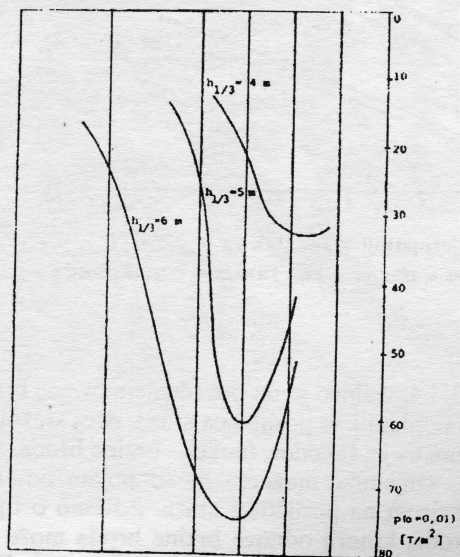
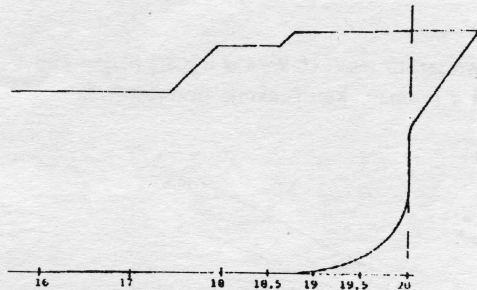
Za primjer uzet je m/b "VINJERAC", plovidba u balastu sa gazovima:

$T_a = 6,01 \text{ m}$ $T_f = 3,41 \text{ m}$
 Okolišni uvjeti: (P - M spektar)
 $H_{1/3} = 4; 5 \text{ i } 6 \text{ m}$, $\mu = 180^\circ$, $\tau = 10 \text{ sati}$
 Dimenzije limova: $a_p = 0,8 \text{ m}$, $b_p = 3,2 \text{ m}$, $h_p = 15 \text{ mm}$



Sl. 1a. Nacrt donjeg dijela pramcanih rebra

R	17	18	18.5	19	19.5
k ₁	29.04	27.10	23.09	13.87	12.10



Sl. 2. Najvjerojatniji max. tlak za vjerojatnost premasivanja $\alpha = 0,01$, $v = 10 \text{ cv}$, $\tau = 10 \text{ sati}$

ODRŽIVA BRZINA S OBZIROM NA DOPUŠTENI TLAK

Pojavom sraza oplata dna broda (posebno na pramčanom dijelu) bit će dodatno izložena naglom povećanju tlaka. Gledano sa stajališta projektanta s obzirom na ugrožavanje komfora posade i putnika, bit će nužno ograničavanje broja srazova u jedinici vremena. Ostale posljedice sraza: naglo povećanje tlaka na oplatu dna, vibracije, pomicanje tereta, oštećenje opreme itd., predstavljaju znatno veći problem.

$$p_c = 12 \sigma_s h_p^2 / (3 - 2 \zeta_0) a_p^2$$

$$\zeta_0 = \beta [(3 + \beta^2)^{1/2} - \beta]$$

$$\beta = a_p / b_p < 1$$

a_p - širina lima

h_p - debljina lima

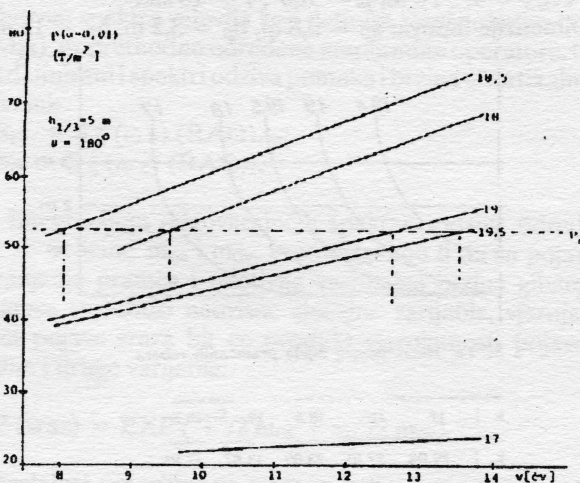
b_p - duljina lima

σ_s - čvrstoća materijala (uzeto $28,0 \times 10^3 \text{ t/m}^2$)

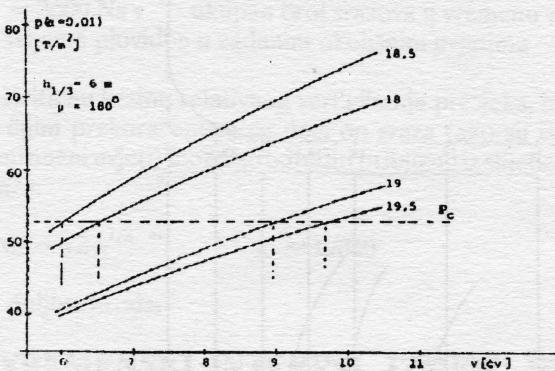
Za odabrani primjer i odabrane dimenzije limova dna dopušteni tlak je:

$$p_c = 52,5 \text{ t/m}^2$$

Procjena održive brzine s obzirom na mogućnost oštećenja dna izvedena je uz vjerojatnost premašivanja tlaka $\alpha = 0,01$, tj. sa sigurnošću od 99% da do prekoračenja neće doći. Dobivene vrijednosti tlaka sraza za značajnu valnu visinu 5 i 6 metara, a za različite presjke broda, ucrtane su u dijagram na slici 5.

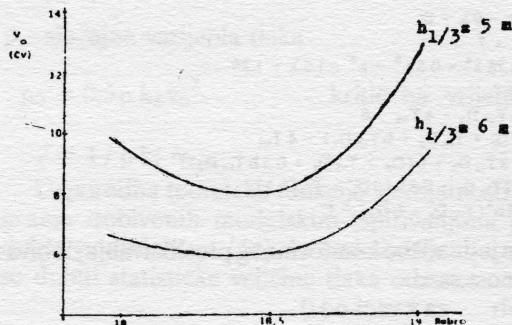


Sl. 3 Najvjerojatniji max. tlak za $\alpha = 0.01$, $h_{1/3} = 5 \text{ m}$, valovi u pramac, kao funkcija brzine broda



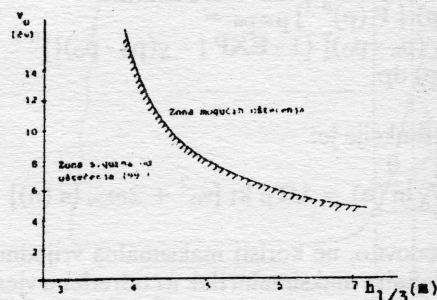
Sl. 4 Najvjerojatniji max. tlak za $\alpha = 0.01$, $h_{1/3} = 6 \text{ m}$, valovi u pramac, kao funkcija brzine broda

Iz slika 3. i 4. vidljivo je da povećanjem brzine broda raste tlak na oplatu kao posljedica sraza. Broj srazova u jedinici vremena je, također, funkcija brzine broda. Koristeći ovu činjenicu, možemo uvesti pojam održive brzine s obzirom na posljedice sraza. Zavisno o tipu i namjeni broda, kriterij održive brzine broda može biti definiran na bazi ograničenog broja srazova u jedinici vremena (pri zadanom stanju okoliša) ili dopuštenog tlaka na oplatu dna broda. Dopušteni tlak predstavlja onaj tlak kod kojeg nastaju trajne plastične deformacije. Prema (14) taj tlak se može izraziti kao:



Sl. 5 Održiva brzina za najugroženije presjke obzirom na dopušteni tlak p_c .

Vidi se da je najugroženije područje oko rebra 18,5. Uzimajući taj presjek kao mjerodavan, dobivena su dva područja brzina plovidbe u definiranim okolišnim uvjetima (sl.6): područje brzina u kojem neće doći do trajnih deformacija oplata dna i područje u kojem su oštećenja moguća. Koristeći obrnuti put, moguće je odrediti debljinu lima ili njegove dimenzije za određenu brzinu plovidbe i određene okolišne uvjete.



Sl. 6 Održiva brzina kao funkcija znač. valne visine obzirom na dopušteni tlak, reb. 18.5

ZAKLJUČAK

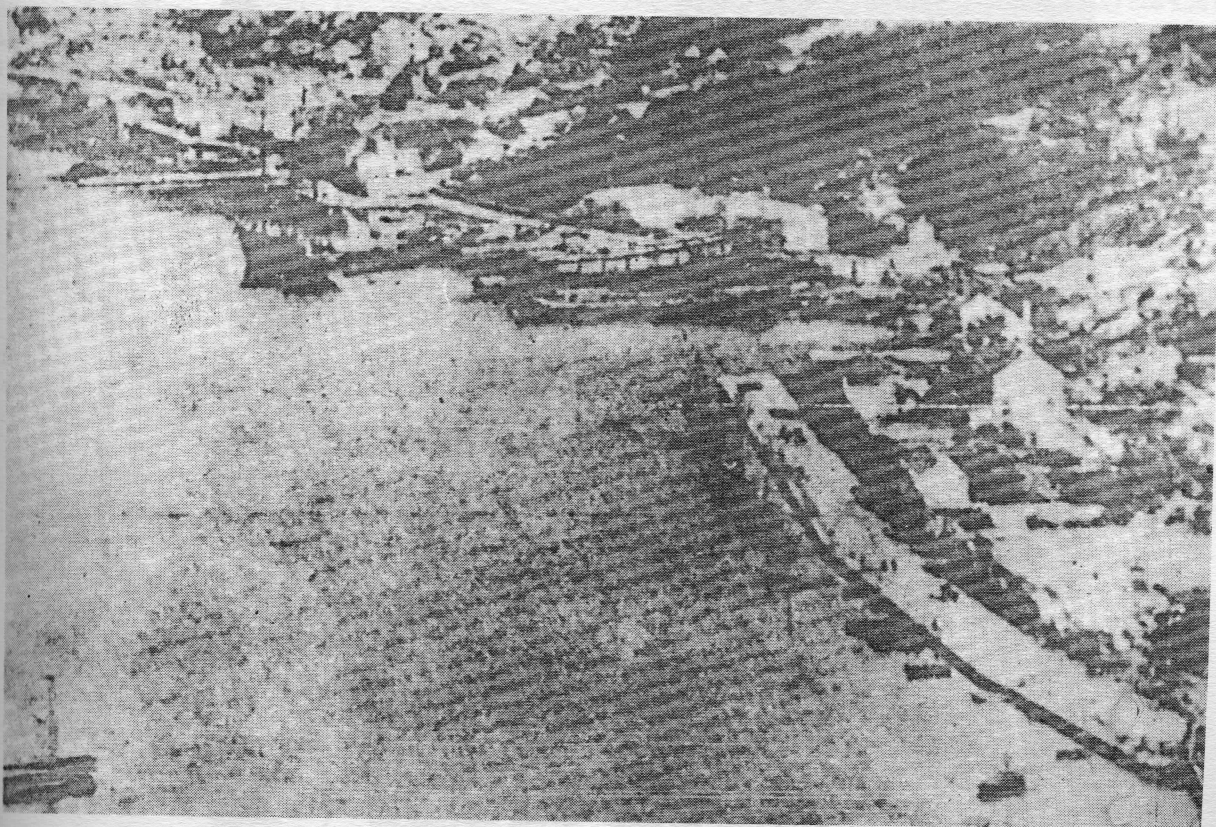
Pojava sraza i njegove posljedice predstavlja ozbiljan problem s kojim treba računati već u fazi rješavanja idejnog projekta broda. Pretjerano veliki broj srazova u jedinici vremena bitno umanjuje ukupnu efikasnost broda, bez obzira da li se radi o putničkom ili teretnom brodu. U eksploataciji takvog broda, redukcija brzine je neminovna. Analiza sraza i njegovih posljedica pokazuje da je moguće utjecati na njegove značajke u fazi projektiranja. Kvantificiranje najbitnijih efekata sraza omogućava određivanje dopuštene brzine broda za odabranu konstrukciju dna pramca broda ili, obrnuto, određivanje potrebne konstrukcije za zadanu brzinu broda.

Koeficijent forme k_1 donjeg dijela pramčanih rebara je od bitnog utjecaja na razmatrane veličine. Promjenom donjeg dijela forme rebra promijenit će se i koef. forme k_1 , a time i najvjerojatniji maksimalni tlak za ukupan broj srazova.

LITERATURA

1. Bales N.K. & W.E. Cummins, "The Influence of Hull Form of Seakeeping", Trans. SNAME, 1970.
2. Bhattacharyya R., "Dynamics of Marine Vehicles", John Wiley & Sons, New York, 1978.
3. Beukelman W., Huijser A., "Variation of Parameters Determining Seakeeping", ISP, 1977.

4. Bishop R.E.D., Price W.G., "Probabilistic Theory of Ship Dynamics", Chapman and Hall Ltd., London, 1974.
5. Borodai I.K., Necetaev Nj.A., "Kačka sudov na morskome valnenii", Lenjingrad, 1969.
6. Čuvalo M., "Izbor optimalne forme u pretprojektu broda", Doktorska disertacija, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, lipanj 1990.
7. Gerritsma J., "Experimental Determination of Damping, Added Mass and Added Mass Moment of Inertia of a Ship Model", ISP, 1957.
8. Gerritsma J. & Beukelman W., "Analysis of the Modified Strip Theory for the Calculation of Ship Motions and Wave Bending Moments", ISP, 1967.
9. Kanerva M., "Designing Passenger Ships for in-service Conditions", The Naval Architect, April 1989.
10. Korvin-Krukovsky B.V., "Theory of Seakeeping", SNAME, 1961.
11. Lewis E.V., "The Motion of Ship in Waves", Principles of Naval Architecture, Comstock, 1967.
12. Moor D.I., "Effects on Performance in Still Water and Waves of Some Geometric Changes to the Form of a Large Twin Screw Ship", SNAME Annual Meeting, New York, 1970.
13. Matošić Š., "Ugladivanje forme broda komformnim preslikavanjem", VI simpozij Teorija i praksa brodogradnje, Zbornik radova, Beograd, 1984.
14. Ochi M.K. and Motter L.E., "Prediction of Slamming Characteristics and Hull Response for Ship Design", Trans. SNAME, 1973.
15. Ochi M.K. and Motter L.E., "A Method to Estimate Slamming Characteristics for Ship Design", Marine Technology, Vol.8, 1971.
16. Wijngaarden A.M., "The Optimum Form of a Small Hull for the North Sea Area", ISP, 1984.
17. Williams A., "Some Recent Trends in Hull Forms for Merchant Ships", Publication of the Swedish State Shipbuilding Experimental Tank, Goteborg, 1978.
18. Yourkov N., "Vertical Motions of Ships With Different Forms of Forebody", ISP, 1973.



Gruški škar i porinuće "Dvanaestog Dubrovačkog" 1875. godine