

Damir Radan*
Josip Lovrić**
Ivan Prce***

PREGLED ISTRAŽIVANJA OBRADE BALASTNIH VODA TOPLINSKOM METODOM

The survey of ballast water heat treatment research

ISSN 0469-6255
(171-177)

UDK 504.42.064
Pregledni članak
Review

Sažetak

Toplinska metoda obrade balastnih voda čini se vrlo prihvatljivom jer omogućuje iskorištavanje otpadne energije hlađenja dizelskog motora. Također, potreba za izbjegavanjem načina obrade koji može biti opasan za okoliš pridonosi još većem poticaju razvoja toplinske metode. U radu su predstavljeni osnovni poznati sustavi za obradu koji se zasnivaju na cirkulaciji u otvorenom i zatvorenom krugu. Opisani su svi nedostaci cirkulacije u otvorenom krugu. Obrada balasta cirkulacijom u otvorenom krugu zasniva se na ispiranju balasta (dilution) koje je potpomognuto zagrijavanjem. Toplinska obrada u zatvorenom krugu cirkulacije podrazumijeva neispuštanje balasta, odnosno potpunu obradu vode koja je uzeta u luci polaska. Obrada u zatvorenom krugu cirkulacije može biti izvedena po biološkim kriterijima kratkog i srednjeg izlaganja organizama. Za očekivati je najbolju primjenjivost sustava za obradu u zatvorenom krugu cirkulacije po biološkom kriteriju kratkog izlaganja organizama.

Summary

Ballast water heat treatment seems to be very acceptable method of the inactivation of marine organism contained in ballast water. It allows the use of waste heat from diesel engine cooling system. The necessity for avoiding the method of treatment that could be harmful for the environment serves as an incentive in heat method development. This paper has dealt with the basic known treatment systems that are based on open or closed circle of circulation. All disadvantages of heat treatment in an open circle have been explained. The heat treatment in an open

circle is based on continuous ballast dilution and heating. Heat treatment in a closed circle means the treatment of all the water that is taken in port. Heat treatment in closed circle can be carried out according to biological strategies of short and medium time of exposure. Short time biological strategy exposure treatment in a closed circle is expected to give best results.

1. Uvod

Introduction

Promatrajući problem balasta naizgled se čini da postoji veliki broj mogućnosti obrade balastnih voda na brodu. Međutim, ako se uzme u obzir da odabrane opcije moraju zadovoljiti ostale ekološke zahtjeve (rješavanjem jednog problema ne smije se stvoriti drugi), te da se predloženi sustav treba što bezbolnije uklopiti u postojeće brodske sustave, i to uz što manje troškove ugradnje i troškove obrade, može se zaključiti da naposljetku preostaje vrlo mali broj mogućnosti. Da bi predložena metoda obrade bila prihvaćena, mora zadovoljiti sljedeće zahtjeve:

- sigurnost (povezano s pojavom nedopuštenih naprezanja brodske konstrukcije, lokalnih naprezanja zbog porasta tlaka u tankovima i sl.)
- ekološku prikladnost (povezano s problemom obrade kemikalijama – napr. klor)
- efikasnost u tehničkom smislu – postizanje ugibanja (ili odstranjivanja) što većeg broja organizama
- niske troškove ugradnje postrojenja za obradu i niske troškove iskorištavanja
- praktičnost (povezano s trajanjem obrade, automatiziranosti procesa, kompleksnosti izvedbe i mogućnosti zastoja)

Velika prednost toplinske obrade balasta je u tome što ona zadovoljava sve navedene zahtjeve. Najvažniji nedostatak je što nikada neće moći biti primijenjena na

* Mr. sc. Damir Radan, Veleučilište u Dubrovniku, Ćira Carića 4, 20000 Dubrovnik

** Dr. sc. Josip Lovrić, Veleučilište u Dubrovniku, Ćira Carića 4, 20000 Dubrovnik

*** Mr. sc. Ivan Prce, Veleučilište u Dubrovniku, Ćira Carića 4, 20000 Dubrovnik

brodove koji prelaze kratke rute. Naime, pokazalo se da na brodovima čija putovanja traju manje od oko 6 do 8 dana nije moguće stići obraditi svu balastnu vodu toplinskom metodom. Međutim, to ne isključuje mogućnost ubrzanja procesa obrade kombiniranom metodom. Tako naprimjer, postoje naznake da se ultrazvukom može poboljšati prijelaz topline s vode na morske organizme. Također, poznato je da se proces obrade ozonom ili UV može poboljšati zagrijavanjem.

Osnovni parametri i ograničavajući faktori koji utječu na primjenjivost i izvedbu toplinske metode obrade balastnih voda su:

- biološki kriteriji:
 - zahtijevana temperatura obrade
 - vrijeme izlaganja morskih organizama (duration)
 - količina balasta na brodu
 - količina raspoložive topline (dizelskog motora, generatora pare i sl.)
 - raspoloživa temperatura medija za zagrijavanje balastne vode
 - raspoloživo vrijeme za obradu – prosječno trajanje putovanja
 - okolišna temperatura morske vode – temperatura balastne vode
 - temperaturna naprezanja brodske konstrukcije

2. Biološki kriteriji toplinske obrade balastnih voda

Biological criteria for ballast water heat treatment

Pri određivanju strategije i načina toplinske obrade balastnih voda potrebno je voditi računa o postojećim biološkim kriterijima. S obzirom na postojanje velikog broja vrsta organizama u morskoj vodi vrlo je teško odrediti optimalnu temperaturu zagrijavanja na kojoj pojedini organizmi ugibaju kao i potrebno vrijeme njihove izloženosti toj temperaturi. Zbog toga, biolozi nastoje ispitati samo najotpornije organizme. U sljedećim tablicama prikazani su rezultati međusobno neovisnih istraživanja.

Izlaganje	trajanje	temperatura
kratko	0.5 to 3 minute	oko 45 °C
srednje	do 7 sati	35 to 40 °C
dulje	3 ili više dana	32 °C

Tablica 1. Gotovo potpuno ugibanje cista dinoflagelata (dinoflagellate hypnocyts), Hallegraeff et al., 1997 [1]

Table 1. Total disappearance of dinoflagellate hypnocyts

Izlaganje	trajanje	temperatura
kratko	≤ 10 minuta	≥ 46 °C
srednje	10 min. to 16 sati	36 to 45 °C
dulje	≥ 16 sati	≤ 36 °C

Tablica 2. Gotovo potpuno ugibanje najotpornijih organizama, Mountfort et al., 1999 [2]

Table 2. Total extinction of the most resistant organisms

Prema tome, mogu se odrediti osnovne strategije toplinske obrade balastnih voda:

- kratko izlaganje organizama;
- srednje izlaganje organizama;
- dulje izlaganje organizama.

Naime, trajanje putovanja, temperatura okolišne morske vode, odnosno morske vode u balastnom tanku, te količina raspoložive topline na brodu glavni su parametri koji ograničavaju primjenu toplinske metode. Strategije toplinske obrade balastnih voda zasnivaju se na rezultatima laboratorijskih ispitivanja kao i ispitivanja na brodovima (*full-scale trials*). Najrealnije je očekivati primjenu kratkog ili srednjeg izlaganja organizama.

3. Metode toplinske obrade balastnih voda

The methods of ballast water heat treatment

Posljednih desetak godina neovisnim istraživanjima pojedinih institucija određeno je nekoliko najpovoljnijih načina toplinske obrade balastnih voda. Sva ona su potaknuta najznačajnijim radom Bolcha i Hallegraeffa iz 1993. godine u kojem su autori objavili rezultate istraživanja na cistama dinoflagelata (*Gymnodinium catenatum*). Pri zagrijavanju na temperaturi od 40 do 45 °C, u trajanju od 30 do 90 sekundi ustanovljeno je potpuno ugibanje navedene vrste organizama.

Budući da na postojećim rashladnim sustavima glavnog dizelskog motora vrijednost temperature na izlazu morske vode iznosi nešto manje od 45 °C (pri tropskim uvjetima rada kada je temp. morske vode na ulazu 32 °C), zaključeno je da postoji mogućnost dobre primjenjivosti toplinske metode obrade balastnih voda na brodovima. Naime, vrlo veliki dio otpadne topline iz rashladnog sustava dizelskog motora moguće je iskoristiti za zagrijavanje balasta. Sasvim je razumljivo da je takva obrada moguća samo za vrijeme rada glavnog motora, dakle u plovidbi broda. Tom činjenicom postavljena su dva najvažnija ograničenja toplinske metode:

- raspoloživo vrijeme za obradu (ovisno o trajanju putovanja),

- temperatura okolišne morske vode.

Brzina obrade balastnih voda najviše je ograničena izvedbom sustava balasta. Dakle, brzinu obrade moguće je povećati jedino izvedbom što efikasnijeg sustava obrade. Polazeći od postavke da je moguće predložiti samo manje preinake rashladnog sustava glavnog motora i sustava balasta, opcije predložene u tekstu koji slijedi čine se prikladnim rješenjima.

3.1. Toplinska obrada u otvorenom krugu cirkulacije

Heat treatment in an open circle

Toplinsku obradu u otvorenom krugu cirkulacije predložili su Rigby i Hallegraef 1994. godine. Na brodu za prijevoz rasutog tereta *Iron Whyalla* izveli su ispitivanja učinkovitosti njihove metode [3]. Ispitivanja su nastavljena 1998. i 1999. godine i zaključeno je da je moguće odstraniti od 90 do 99 % organizama.

U otvorenom krugu cirkulacije zagrijana morska voda na izlazu iz rashladnog sustava glavnog dizelskog motora, dovodi se u balastni tank balastnim cjevovodom. Višak vode izlazi kroz odušnike na tanku, te kroz ostale otvore (otvor za inspekciju). Opisana metoda obrade zasniva se na kombinaciji zagrijavanja s izmjenom balastne vode u tanku ispiranjem. Budući da je potrebno 20 do 30 sati da se postigne maksimalna temperatura vode u balastnom tanku, toplinska obrada u otvorenom krugu cirkulacije odgovara biološkim kriterijima srednjeg i dugog izlaganja organizama koje se definirane u tablicama 1 i 2.

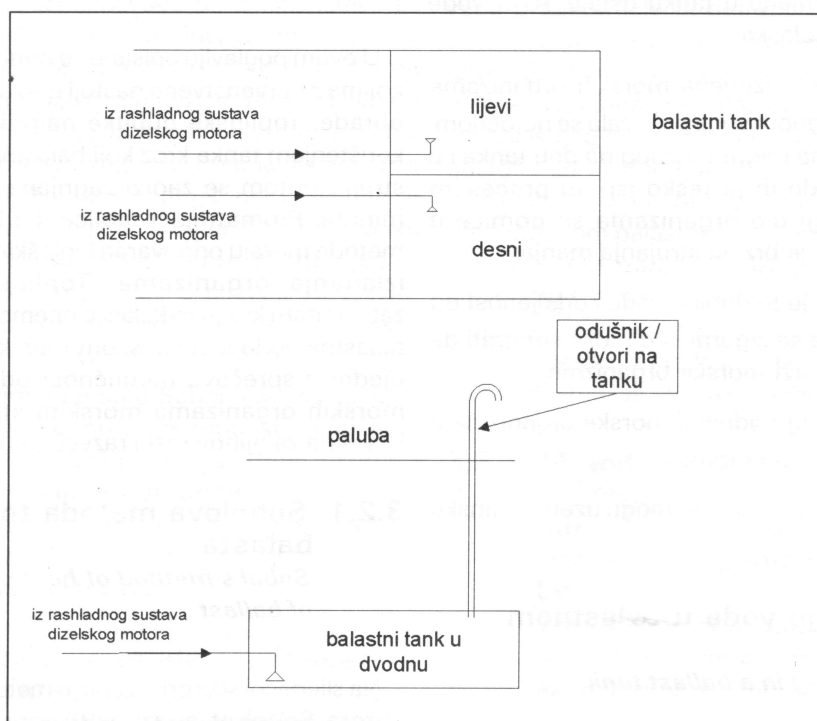
3.1.1. Izmjena balastne vode u tanku ispiranjem

The exchange of ballast water in tank by washing

Trenutačno jedina zadovoljavajuća metoda obrade je ispiranje balasta. Ispiranje balasta je metoda izmjene balastne vode u tanku kontinuiranim miješanjem s morskom vodom iz oceana koja sadrži vrlo mali broj morskih organizama. Naime, voda uzeta u luci polaska sadrži veći broj morskih organizama što povećava rizik prijenosa organizama koji mogu negativno utjecati na okoliš u luci ispuštanja balasta. Oceanska voda sadrži vrlo mali broj morskih organizama i ima veći salinitet od voda u lukama. Obično se uzima da je salinitet oceanske vode jednak 35/1000. Provjerom saliniteta balastne vode ujedno se provjerava i njezina izmjena.

Ograničenja vezana uz uzdužnu čvrstoću broda i stabilitet onemogućavaju pražnjenje i punjenje balastnih tankova na otvorenom moru. Korištenjem dijagonalne sekvencijalne metode izmjene balasta ta se ograničenja jednim dijelom mogu prevladati. Međutim, niti jedna od metoda ne može se dugoročno primijeniti bez prihvaćanja određenih izmjena u sustavu balasta od strane IMO-a. Jedna od nužnih izmjena svakako su veći otvori odušnika na tankovima. Osnovna prednost metode ispiranja balasta u usporedbi s metodom sekvencijalne izmjene je što tank ostaje trajno napunjen vodom čime se onemogućava utjecaj slobodnih površina na stabilitet broda kao i utjecaji promjene rasporeda masa na brodu, što također znači da nema promjena smičnih sila i momenata savijanja (u mirnoj vodi).

U sljedećoj tablici prikazani su rezultati izmjene



Slika 1. Toplinska obrada balasta u otvorenom krugu cirkulacije

Fig. 1. Heat treatment of ballast in an open circle

balasta kontinuiranim mješanjem s oceanskom vodom. Također su prikazani rezultati ispitivanja učinkovitosti u odstranjivanju organizama za metodu pražnjenja / punjenja balasta i sekvencijalnu metodu izmjene balasta.

Izmjena kontinuiranim ispiranjem	Učinnost u odstranjivanju organizama
broj izmjena:	
1	39,3 %
2	63,2 %
3	95 %
4	98,2 %
pražnjenje /punjenje balasta (rebalastiranje)	99,2 do 99,8 %
sekvencijalna metoda	> 99%

Tablica 3. Učinnost metoda izmjene balasta [4]

Table 3. The efficiency of the ballast exchange methods

Nedostaci metode ispiranja balasta *Drawbacks of the method of ballast washing*

- Za postizanje 90-postotne zamjene balastne vode u tanku morskom vodom iz oceana potrebno je kroz balastni tank prepumpati trostruko veću količinu vode od one koja se prvotno nalazila u tanku. To znači da je kroz tank koji sadrži 5 000 tona balasta, potrebno prepumpati 15 000 tona morske vode iz oceana. Po završetku procesa izmjene u tanku ostaje 10 % vode koja je uzeta u luci polaska.

- Pretpostavka da je izmjena morskih organizama proporcionalna s izmjenom vode pokazala se netočnom. Naime, dio organizama migrira u talog na dnu tanka i u ostale prostore odakle ih je teško isprati procesom mješanja vode. Drugi dio organizama se pomiče u prostore u tanku gdje je brzina strujanja manja.

- Dvojbena je koja je to dubina vode i udaljenost od kopna potrebna da se sa sigurnošću može smatrati da oceanska voda ne sadrži morske organizme.

- Morske struje mogu odnijeti morske organizme u područja povoljna za rast i razvoj.

- Obalni brodovi (Australija) ne mogu uzeti oceansku morsku vodu.

3.1.2. Zagrijavanje vode u balastnom tanku

Water heating in a ballast tank

Zagrijavanjem vode u balastnom tanku smanjuje se potreban broj izmjena balasta ispiranjem oceanskom morskom vodom. Budući da je maseni protok vode kroz

rashladni sustav broda *Iron Whyalla* ograničen na 520 t/h, protjecanjem balastne vode kroz otvore na tanku naprezanja strukture tanka zbog porasta tlaka ne mogu značajno porasti (u usporedbi s protokom od 2000 t/h svake balastne pumpe). U radovima [5], [6] određen je protok morske vode kroz rashladni sustav broda prema nominalnoj snazi motora $M_{sw} / P_{nom} = 0,024 - 0,030 \text{ m}^3 / \text{kWh}$.

Nedostaci toplinske obrade u otvorenom krugu cirkulacije

Drawbacks of the heating treatment in an open circle

Osnovni nedostatak kombinacije metode ispiranja balasta u tanku s toplinskom metodom je povećanje toplinskih gubitaka zbog kontinuiranog ispuštanja zagrijane morske vode kroz otvore na tanku. Također, zagrijavanje na temperaturu iznad 40 °C neizoliranog balastnog tanka relativno malom količinom topline onemogućeno je zbog velikih toplinskih gubitaka preko brodske oplata. Osim toga, potrebno je primijetiti da je pri ispitivanju temperatura morske vode bila uglavnom oko 30 do 32 °C, što odgovara tropskim uvjetima. Čak i u takvim uvjetima nije se uspjelo postići homogenu temperaturu unutar balastnog tanka koja je varirala od 35 do 38 °C i to tek nakon 2,5 izmjene balasta u tanku. Zbog toga je sasvim razumljivo da je pri toplinskoj metodi obrade balasta potrebno maksimalno umanjiti toplinske gubitke kako bi se vrijeme obrade što više skratilo.

3.2. Toplinska obrada u zatvorenom krugu cirkulacije

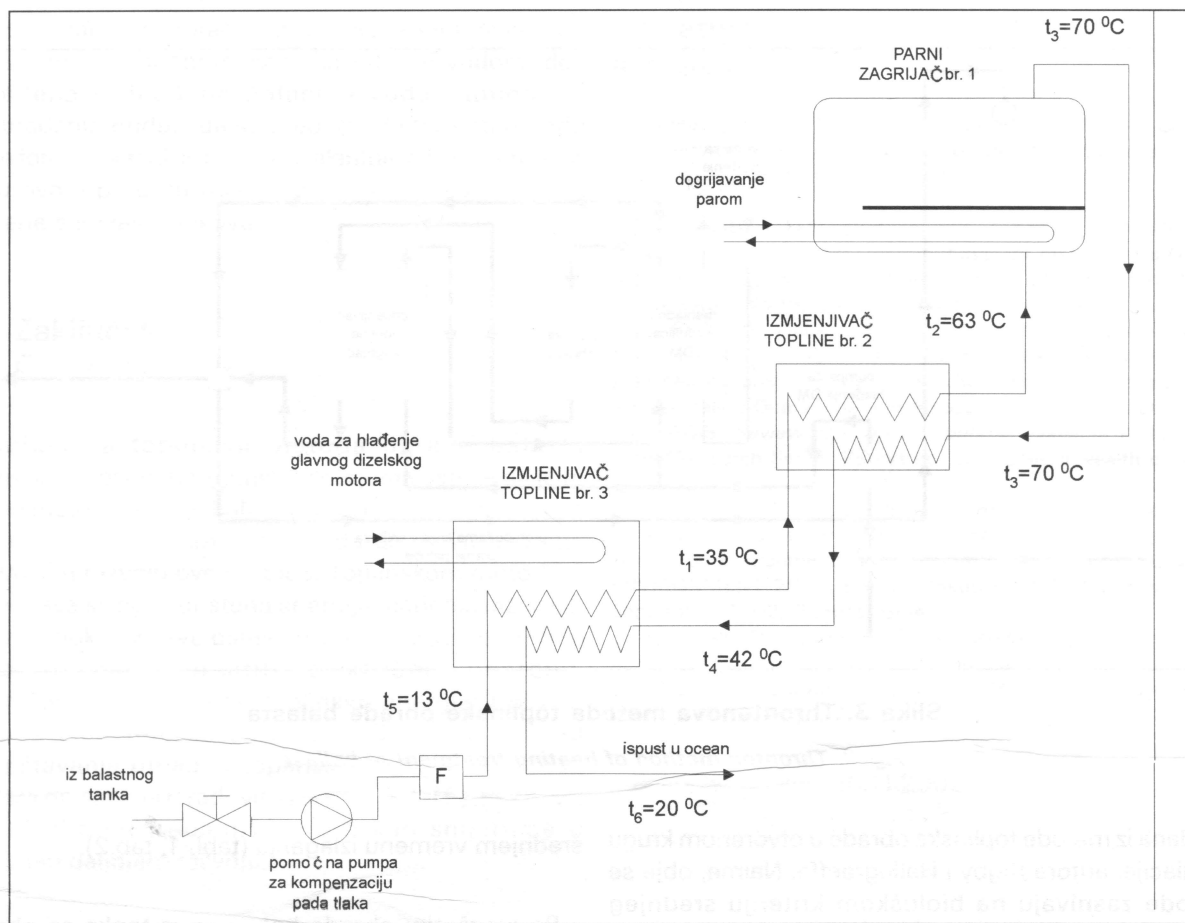
Heating treatment in a closed circle

U ovom poglavlju opisane su metode toplinske obrade kojima se prvenstveno nastoji ubrzati cjelokupan proces obrade. Toplinske gubitke najprikladnije je umanjiti korištenjem tanka kroz koji balastna voda kontinuirano struji i pritom se zadrži zagrijana oko jedne do dvije minute. Promatrajući tablice 1 i 2 očito je da takve metode moraju odgovarati biološkim kriterijima kratkog izlaganja organizama. Toplinskom obradom u zatvorenom krugu cirkulacije onemogućava se miješanje balastne vode s oceanskom morskom vodom čime se ujedno i sprečava mogućnost odnošenja ispuštenih morskih organizama morskim strujama u područja povoljna za njihov rast i razvoj.

3.2.1. Sobolova metoda toplinske obrade balasta

Sobol's method of heating treatment of ballast

Na sljedećoj slici prikazana je metoda toplinske obrade autora Sobol et al. iz 1995. godine [4]. Na slici je prikazan raspored temperatura za slučaj kad hladna balastna voda ulazi u sustav s temperaturom od 13 °C.



Slika 2. Sobolova metoda toplinske obrade balasta

Fig. 2. Sobol's method of heating treatment of ballast

U prolaskom kroz izmjenjivač br. 3 balastna voda se zagrijava na temperaturu od 35°C. Pritom se iskorištava toplina obrađene vode i toplina u rashladnom sustavu dizelskog motora. U izmjenjivaču br. 2 iskorištava se samo toplina obrađene vode budući da temperature morske vode u postojećim rashladnim sustavima dizelskih motora na izlazu imaju temperaturu od oko 45°C. Balastna voda ulazi u parni zagrijač br. 1 s temperaturom od 63°C u kojem se dogrijava parom na temperaturu od 70°C. Parni zagrijač br. 1 izveden je kao tank kroz koji struji balastna voda. Ona se u tanku zadrži oko dvije minute. S obzirom da prosječna temperatura u tanku iznosi 65°C postižu se sasvim zadovoljavajući uvjeti za ugibanje svih morskih organizama uključujući i virus kolere (*Vibrio cholerae*).

Potrebno je napomenuti da u Sobolovom sustavu za toplinsku obradu balasta nisu u potpunosti iskorištene mogućnosti preinake rashladnog sustava glavnog dizelskog motora. Naime određenim preinakama moguće je postići značajne uštede u zagrijavanju balasta. Također, ovim sustavom ne rješava se problem izmjene vode u balastnom tanku.

3.2.2. Throntonova metoda toplinske obrade balasta

Thronton method of heating treatment of ballast

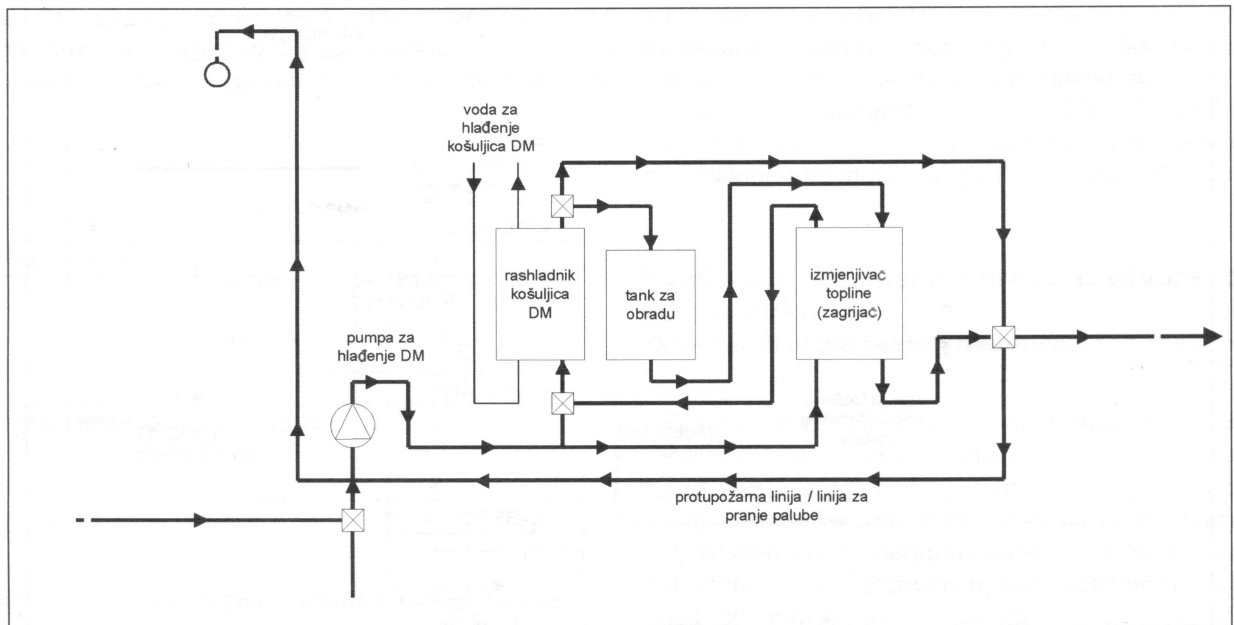
Osnovna ideja Throntonove metode toplinske obrade

balasta zasniva se na recirkulaciji vode u istom balastnom tanku. Kada bi se obrađena voda dobro miješala s neobrađenom za postizanje 90% izmjene vode u tanku, bilo bi potrebno kroz tank prepumpati trostruko veću količinu vode od one koja se nalazi u tanku. Spajanjem na protupožarnu liniju (linija za pranje palube) zagrijava obrađena balastna voda dovodi se na vrh balastnog tanka. Budući da zagrijava voda ima manju gustoću od hladne balastne vode, ona je samim tim i lakša, ima manju tendenciju miješanja s hladnom neobrađenom balastnom vodom u tanku. Pretpostavlja se da bi za postizanje 90% izmjene vode u tanku trebalo biti dovoljno kroz tank prepumpati 1,2 puta veću količinu vode od one koja se nalazi u tanku. To bi znatno ubrzalo proces obrade. Metoda još uvijek nije dovoljno ispitana na brodovima, ali se uskoro očekuju povoljni rezultati.

3.2.3. Metoda toplinske obrade balasta u zatvorenom krugu cirkulacije po biološkom kriteriju srednjeg izlaganja organizama (Radan & Lovrić)

The method of heating treatment of ballast in closed circle according to medium time exposure of organisms

Ovdje je predložena metoda koja je obrađena kroz radove autora Radan et al. [5] i [6]. Osnovna karakteristika ove metode je u tome što je ona izravno



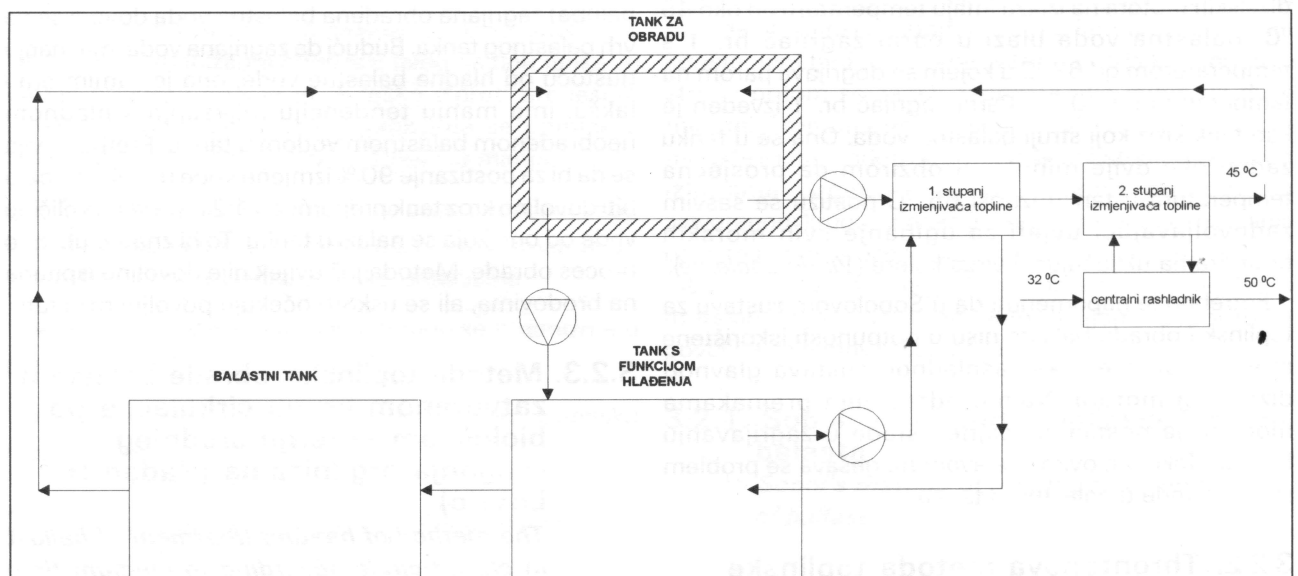
Slika 3. Throntonova metoda toplinske obrade balasta

Fig. 3. Thronton method of heating treatment of ballast

izvedena iz metode toplinske obrade u otvorenom krugu cirkulacije, autora Rigby i Hallegraeffa. Naime, obje se metode zasnivaju na biološkom kriteriju srednjeg izlaganja organizama i zagrijavanju vode u tanku otpadnom toplinom dizelskog motora. Toplinski gubici ispiranjem onemogućeni su ovakvom obradom jer se recirkulira voda koja se nalazi u jednom tanku. Tank treba biti primjereno toplinski izoliran čime se maksimalno povećava brzina obrade balasta. Otpadnom toplinom dizelskog motora balastna se voda u izoliranom tanku zagrijava na potrebnu temperaturu koja odgovara

srednjem vremenu izlaganja (tabl. 1, tab.2).

Po završetku obrade balast se iz tanka za obradu prebaci u tank za toplinsku kompenzaciju, odnosno prostor izveden tako da preuzme toplinska širenja čelične strukture do koje dolazi zbog zagrijavanja. Na taj način smanjuju se temperaturna naprezanja. U kompenzacijskom tanku obrađena voda se ohladi preko stijenki tanka. Dio topline akumulirane u tanku iskoristi se u prvom stupnju izmjenjivača topline, za zagrijavanje



Slika 4. Metoda toplinske obrade balasta po biološkom kriteriju srednjeg izlaganja organizama

Fig. 4. Heat treatment ballast method according to biological criteria of medium time exposure of organisms

balasta u tanku za obradu. Istodobno se tank za obradu napuni novom neobrađenom balastnom vodom, dok obrađena i ohlađena balastna voda zamjenjuje neobrađenu. Budući da se predlaže da tank za obradu bude fore-peak tank ili tank ekvivalentne veličine, proizlazi da u ovom procesu dolazi do povremene kompletne izmjene sadržaja tankova.

7. Zaključak Conclusion

Budući da toplinska metoda obrade balasta zadovoljava osnovne zahtjeve primjenjivosti, te da je to jedina metoda obrade balasta čiji osnovni izvor energije nije električni, sasvim je jasno da će se istraživanja nastaviti u razvoju ove metode. Toplinskom metodom iskorištava se neiskorištena energija hlađenja dizelskih motora, dok je za sve ostale metode obrade potrebno u potpunosti koristiti električnu energiju. Iskorištavanjem otpadne toplinske energije troškovi obrade značajno se snižavaju. Detaljna analiza iskorištavanja otpadne toplinske energije dizelskog motora opisana je u radovima autora [5] i [6]. Prikazani načini obrade trebaju poslužiti kao smjernice u nezinom daljnjem razvoju.

Literatura

References

- [1] Hallegraeff, G.M., Valentine, J.P., Marshall, J.A., & Bolch, C.J., *Temperature tolerances of toxic dinoflagellate cysts: Application to the treatment of ship's ballast water*, Aquatic Ecology, 32, 1997.
- [2] Mountfort, D.O., Dodgshun, T., Gibbs, W. & McCallin B., *Towards a feasible heat treatment system for ship's ballast water*, Proceedings of a workshop, Hillman, S. P.: EcoPorts Monograph Series No.19, Brisbane, Australia, May, 1999.
- [3] Rigby, G., Hallegraeff, & G.M., Sutton, C., *Ballast Water Heating and Sampling Trials on the BHP Ship MV Iron Whyalla in Port Kembla and en-route to Port Hedland*, Report prepared for the Australian Quarantine and Inspection Service, October 1997.
- [4] AQIS, *Review of treatment options available*, AQIS Ballast Water Research Series, Report no. 13, Commonwealth of Australia 2002.
- [5] Radan, D., Lovric, J., *Utilisation of diesel engine waste heat for ship's ballast water heat treatment*, Fourth International Conference on Environmental Problems in Coastal Regions, COASTAL ENVIRONMENT 2002, Wessex Institute of Technology, 16-18 September 2002, Rhodes, Greece
- [6] Radan, D., Lovric, J., *Ballast Water Heat Treatment Options and Possibilities*, 15th International Symposium of Theory and Practice of shipbuilding, SORTA 2002, in memoriam Prof. Leopold Sorta, Trogir, 2002.

Rukopis primljen: 30.11.2002.