

PRISTUP ODABIRU METODE PRIMARNE OBRADJE BRODSKOGA VODENOG BALASTA

An Approach to the Selection of Methods for Ships' Ballast Water Treatment

UDK 628.32:629.12

Pregledni članak
Review

Sažetak

Prijenos organizama u brodskom vodenom balastu i sedimentu jedna je od najvećih prijetnja biorazlikosti mora, ekosustavima i čak ljudskom zdravlju. Balastne su se vode dugo vremena smatrale čistima tako da postupci balastiranja i debalastiranja brodova nisu bili tretirani kao potencijalna opasnost. Problem prijenosa organizama u brodskom vodenom balastu moguće je između ostaloga riješiti s pomoću metoda obrade balastnih voda. Primarnim metodama obrade postiže se efikasno odstranjivanje organizama i čestica u prvom stupnju obrade. U ovom radu prikazane su različite primarne metode obrade zasnivane na centrifugalnim i gravitacijskim procesima koje se mogu primijeniti u sustavima za obradu balastnih voda na brodu i u kopnenim postrojenjima.

Ključne riječi: obrada vodenog balasta, hidrociklonska separacija, centrifugalna separacija, filtracija

Abstract

Transportation of different species and sediments is becoming one of the most significant threats to marine ecosystems, biodiversity and even human health. For the long period of time the ship ballast water has been considered as clean, therefore causing no potential harm to the environment. Possible solution of the problem that occurs with transportation of species through ballast water could be ballast water treatment. With implementation of primary treatment methods efficient separation of species and particles is being provided. In

this paper different ships and shore methods for primary treatment of ships' ballast water, based on centrifugal and gravity principles, are analysed.

Key words: ballast water treatment, hydrocyclon separation, centrifugal separation, filtration

1. Uvod

Introduction

Brodski vodeni balast može sadržavati različite oblike organizama (alge, ciste, ličinke školjkaša, riba, puževa i rakova, te bakterije i viruse). Balastne su se vode dugo vremena smatrale čistima tako da postupci balastiranja i debalastiranja brodova nisu bili tretirani kao potencijalna opasnost. Mnogi planktonski organizmi poznati su po velikom broju životnih stadija, a među njima je posebno zanimljiv stadij cista – začahurenih stanica koje čekaju povoljne uvjete da bi iz latentnog stadija života prešle u aktivni vegetativni stadij. Iako određeni dio organizama ne preživi ulaz u balastni sustav, prolazak kroz usisne rešetke, filtre, balastne pumpe, ventile i uvjete u balastnim tankovima, dio ih može preživjeti u tankovima ili sedimentu, tijekom putovanja koja traju i nekoliko tjedana. Neke organizme koji su ispušteni u nove sredine očekuje razdoblje adaptacije i borba s autohtonim vrstama. Nažalost, preneseni organizmi u novoj sredini često imaju potpuno drugačiji utjecaj nego u sredini iz koje potječu.

Najpoznatiji je unos školjkaša *Dreissena polymorpha* Pallas u Velika jezera, koji se raširio na 40% unutarnjih voda, i uzrokovao je troškove monitoringa i preventive veće od jedne milijarde USD. Unos rebraša *Mnemiopsis leidy* Agassiz u Crno more doveo je do uništavanja planktona što je imalo za posljedicu propast ribarske

* mr. sc. Željko Kurtela, Sveučilište u Dubrovniku, Ćira Carića 4, 20000 Dubrovnik

** dr. sc. Vedran Jelavić, Sveučilište u Dubrovniku, Ćira Carića 4, 20000 Dubrovnik

*** dr. sc. Robert Mohović, Pomorski fakultet u Rijeci, Studentska 2, 51000 Rijeka

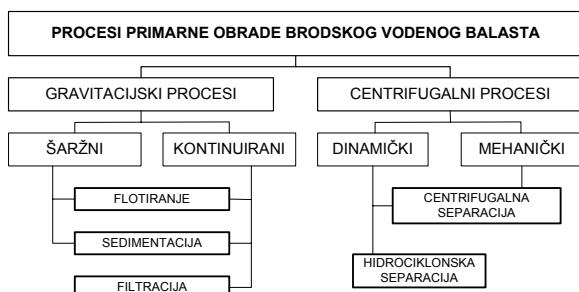
industrije. Unos toksičnog dinoflagelata roda *Alexandrium* koji se dogodio u vodama Australije osobito je opasan jer ga apsorbiraju školjkaši. Zaraženi školjkaši, primjerice kamenice, koje se konzumiraju sirove, mogu uzrokovati paralizu i čak smrt ljudi. Prijenos bakterije *Vibrio cholerae* bio je uzrokom epidemije kolere u Čileu.

Problem prijenosa organizama brodskim vodenim balastom moguće je između ostaloga riješiti s pomoću metoda obrade broskog vodenog balasta. Obrada se može provoditi na brodu, postrojenju na kopnu ili na za to namijenjenom brodu (barži) u luci ukrajca. Svaki od navedenih postupaka mora biti u skladu sa zahtjevima propisanim u Međunarodnoj konvenciji za nadzor i postupanje brodskim vodenim balastom i sedimentom, održanoj u Londonu 2004. godine. Konvencija predviđa izmjenu balasta i proceduru izmjene, te mogućnost odobravanja, tj. testiranja sustava obrade na brodu radi dokazivanja njegove učinkovitosti. Primarnim metodama obrade broskog vodenog balasta moguće je ukloniti veće organizme i sediment i pripremiti balast za daljnju obradu s pomoću neke druge metode koja bi trebala u potpunosti ukloniti sve preostale organizme. Istraživanja koja se provode širom svijeta gotovo uvijek su tako postavljena.

2. Primarne metode obrade

Primary treatment methods

Primarne metode obrade broskog vodenog balasta zasnivaju se na centrifugalnim i gravitacijskim procesima (slika 1.). Obradom vodenog balasta iz tekuće faze (slatka ili morska voda) uklanja se čvrsta faza (žive i/ili nežive čestice). Centrifugalni procesi odvijaju se u centrifugalnom polju i temelje se na pretpostavci da su organizmi u brodskom vodenom balastu veće gustoće od gustoće mora. Prema načinu na koji se ostvaruje centrifugalno polje karakteristični su dinamički i mehanički centrifugalni procesi. U dinamičkim procesima koristi se energijom strujanja tekućine, dok se u mehaničkim služi energijom pogonskog motora. Centrifugalna separacija može se ostvariti mehaničkim i dinamičkim putem, dok se hidrociklonska separacija provodi temeljem dinamičke energije tekućine.



Slika 1. Raščlamba procesa primarne obrade broskog vodenog balasta

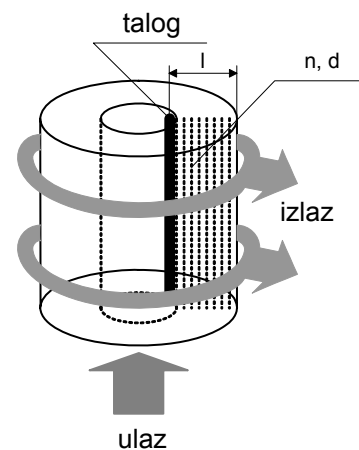
Figure 1. Division of the primary treatment of ballast water processing

Gravitacijski procesi odvijaju se u gravitacijskom polju i omogućuju odvajanje organizama iz vodenog balasta na temelju njihove veličine i gustoće. Gravitacijsko razdvajanje provodi se šaržno (u posudi koja je napunjena i kroz koju ne struji tekućina) ili kontinuirano (u posudi kroz koju kontinuirano struji tekućina). Flotiranje i sedimentacija provode se, prema potrebi, šaržno ili kontinuirano, dok se filtracija broskog vodenog balasta obavlja kontinuiranim protokom kroz filtar. Kod centrifugalnih procesa postiže se i do 10.000 puta veći efekt odvajanja težih čestica u usporedbi s gravitacijskim procesima.

Premda metode primarne obrade kod nekih istraživača (Karaminas¹) nisu prikazane kao pouzdan način uklanjanja organizama, njihova efikasnost može doći do izražaja ako se njima koristi kao primarnom metodom unutar jednog sustava u sprezi s nekom drugom metodom, kao što je npr. ultravioletna radijacija.

2.1. Filtracija

Filtration



Filtracija je proces koji se kontinuirano provodi kroz mrežicu propusnu samo za tekuću fazu i čvrstu fazu promjera čestica manjega od promjera mrežice. Čvrste čestice većeg promjera ostaju na mrežici i u talogu koji se stvara uz mrežicu. Strujanje kroz filtar obično se provodi iz sredine prema obodu filtra (slika 2.).

Slika 2. Proces filtracije
Figure 2. Filtration process

U filtraciji broskog vodenog balasta odvajaju se organizmi od balastne vode s pomoću poroznih materijala. Na filtrima će zaostati naslage organizama kojih je količina proporcionalna propusnosti filtra. Što je propusnost manja, veća je efikasnost odvajanja, ali to ima za posljedicu manji protok kroz filtar. Proces filtracije zahtijeva periodičko čišćenje filtra u radu. Izbor propusnosti filtra ovisi o tome koji se organizmi žele odstraniti (slika 3.).

Prema Tayloru² filtracija je preporučljiva kao primarna metoda s filtrima u rasponu između 25 i 50 μm prije sekundarnog tretmana balasta ultravioletnom sterilizacijom. Naslage je moguće odstraniti automatskim

¹ L. KARMINAS, *An Investigation of ballast water management methods with particular emphasis on the risk of the sequential method*, Lloyd's register of Shipping, London 2000, p. 2.

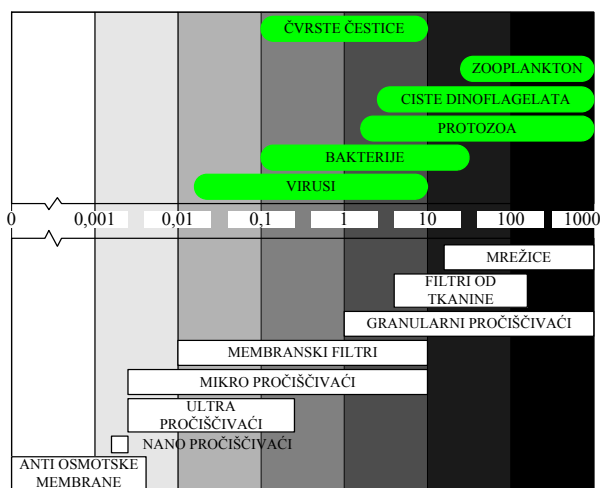
² A. TAYLOR et al., *Suggested Design to Facilitate Improved Management and Treatment of Ballast Water on New and Existing Ship*, Alan H Taylor Associates Pt, 2001, p. 22.

povratnim ispiranjem u radu³; međutim, takve veličine filtara nisu djelotvorne za odstranjivanje protozoa, bakterija i virusa pa se stoga filtar upotrebljava samo za primarni tretman. Samočistivi mrežasti filtri mogu postići pročišćivanje čak do 3 µm.

Brzina procesa filtracije kroz filtarski kolač, za koji se uzima laminarno strujanje tekućine, može se izračunati iz modificirane Darcyjeve jednadžbe [26]:

$$v_{\text{filt}} = D_a \Delta p / \eta l \quad (1)$$

Brzina procesa filtracije (v_{filt}) upravo je proporcionalna Darcyjevoj konstanti propusnosti (D_a) i padu tlaka ispred i iza filtra (Δp), a obrnuto je proporcionalna dinamičkom viskozitetu tekućine (η) i duljini pore filtra (l). Konstanta propusnosti (D_a) ovisi o broju pora u jedinici površine kolača (n) i o površini svake pojedine pore ($d^2 \pi / 4$).



Slika 3. Veličina morskih organizama i propusnost pojedinih vrsta filtara u µm

Figure 3. Size of the marine species related to filterability in µm

U postojećim brodskim balastnim sustavima ugrađene su rešetke na usisnim košarama i filtri na oplatnim usisnim ventilima i balastnim pumpama. Njihova efikasnost odstranjivanja organizama je zanemariva jer se veličine otvora rešetki kreću 40 – 100 mm, a filtara 6 - 20 mm.

2.1.1. Brza pješčana filtracija

Fast sand filtration

Brza pješčana filtracija se već rabi u obradi pitke i otpadne vode. Pješčanom filtracijom odstranjuju se organizmi i ublažava zamućenost vode. Odstranjivanje organizama zasniva se na mehaničkom filtriranju organizama koji su veći od pora filtara, zadržavanju

³ Automatsko povratno ispiranje (*Automatically backwashing*) je sustav koji se primjenjuje za ispiranje u radu filtara na mnogim brodskim strojnim sustavima (sustav ulja, sustav goriva, kaljučni separatori itd.).

manjih čestica i organizama u porama, taloženju u aktivnom sloju filtara, porastu flokulacije⁴ i biološkoj degradaciji (Metcalf⁵). Brza pješčana filtracija zahtijeva radnu površinu od 33 do 200 m² za obradu oko 1000 m³/h balastne vode. Ovi filtri zadržavaju čestice u rasponu od 1,5 do 60 µm. Porast protoka dovodi do smanjenja efikasnosti filtara. Za njihov ispravan rad valja održavati koagulaciju⁶ i flokulaciju (Kawamura⁷). Ova metoda može imati primjenu u kopnenim postrojenjima.

2.1.2. Membranska filtracija

Membrane filtration

Membranski filtri mogu ukloniti bakterije i viruse iz vode ako imaju veličinu pora manju od 0,1 µm (Mallevalle et al.)⁸. Virusi se uklanjaju adsorpcijom na membrani i u nečistoći koja se nataloži na membrani (McGahey⁹). Membrana zadržava organizme koji apsorbiraju viruse u retencionim slojevima. Za zaštitu membrana od većih čestica služi prefiltracija filterima od 50 µm do 200 µm, a za zaštitu polimera od kojih su napravljene membrane potrebno je prilagoditi pH vrijednosti balastne vode. Zbog visokih kapitalnih troškova i troškova u radu, membranskim se filterima koristi samo za manja postrojenja za obradu pitkih voda na kopnu. Prema Owen¹⁰ ukupni troškovi membranske filtracije su od 12 do 22 puta veći od onih za druge metode obrade.

2.1.3. Granularna filtracija

Granular filtration

Granularna filtracija osniva se na prolasku balastne vode kroz zrnate filtre. Učinkovito se pročišćivanje postiže kada se prilikom filtracije koristi sredstvima za koagulaciju koja vezuju fino raspršene čestice potpomažući njihovo zadržavanje na filtru. Sredstvo za koagulaciju mogu biti metalne soli, kao što su aluminijev sulfat i željezni sulfat. Kroz zrnate filtre balastna voda prolazi slobodnim padom u otvorenim bazenima ili tankovima. Zbog relativno velike zahtijevane površine metoda nije primjenjiva na brodovima, već u postrojenjima na kopnu.

⁴ Flokulacija je proces formiranja manjih čestica u veće.

⁵ METCALF & EDDY, *Wastewater Engineering, Treatment Disposal Reuse*. McGraw Hill, 1991.

⁶ Koagulacija je zgrušavanje organizama i čestica na aktivnom sloju filtra.

⁷ S. KAWAMURA, *Integrated Design of Water Treatment Facilities*, John Wiley & Sons, 1991.

⁸ J. MALLEVALLE, P.E. ODENAAL, M.R. WIESNER, *Water Treatment Membrane Processes*, American Water Work Association, Lyonnaise des Eaux & Water Research Commission of South Africa, 1996.

⁹ C. MCGAHEY, V. OLIVIERI, *Mechanisms of Virtual Capture by Microfiltration*, *Water Science and Technology* 27, 1993 p. 307 – 310.

¹⁰ G. OWEN et. al., *Economic Assessment of Membrane Processes for Water and Waste Water Treatment*. *Journal of Membrane Science* 102, 1995, p.78.

2.1.4. Antiosmotska filtracija

Reverse osmosis filtration

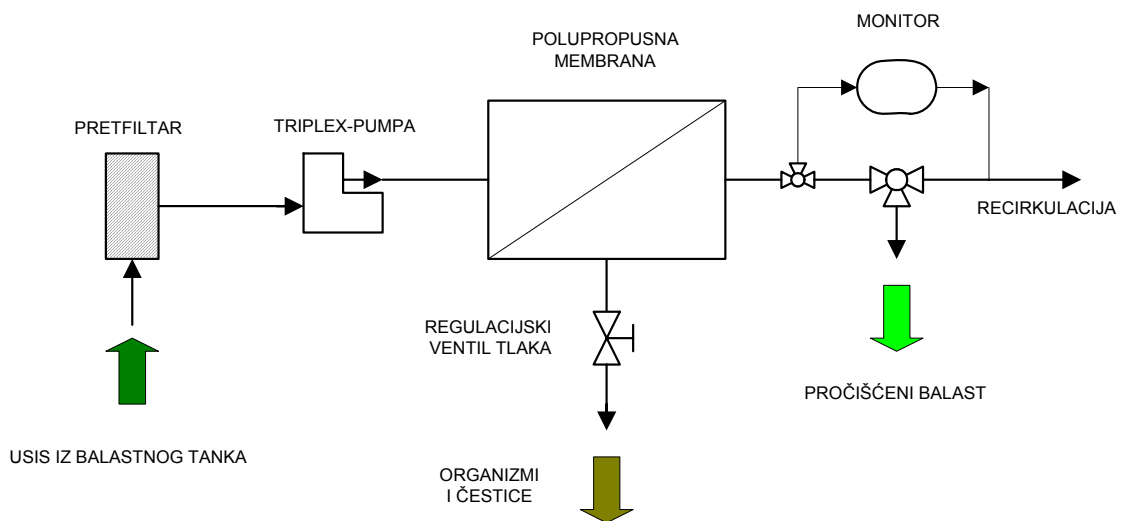
Antiosmotska filtracija zasniva se na prolasku balastne vode kroz vlaknaste membrane veličine otvora od oko 0,01 μm. Membrane su složene u kartice koje tvore module. Ultrafiltracijom i antiosmotskom filtracijom moguće je iz balastne vode ukloniti i gotovo sve viruse.

Za pravilno razumijevanje antiosmoskog procesa pogodno je poći od pojma procesa osmoze. Osmoza je spontani prolazak vode kroz polupropusnu membranu. Kada se u posudi postavi polupropusna membrana i s jedne strane nje ulije morska, a s druge slatka voda, prirodna je težnja slatke vode da prostrujava kroz membranu prema morskoj vodi, tj. obavlja se prostrujavanje tekućine manje gustoće prema tekućini veće gustoće. Takav prirodni fenomen zove se osmoza. Da bi se uspostavio obrnuti proces, mora se uspostaviti tlak - koji je veći od osmotskog tlaka, na strani morske vode, tako da sada morska voda prostrujava kroz membranu prema slatkoj vodi. Taj obrnuti proces naziva se reverzibilna osmoza ili antiosmoza. Proces se na brodovima već rabi za dobivanje slatke vode iz morske vode (Kurtela¹¹). Polupropusna membrana propušta vodu, dok soli, minerali i organizmi ne mogu proći kroz nju. Minimalni tlak potreban za prolazak balastne

vode kroz membranu iznosi 22 bara, ali se zbog povećanja kapaciteta uređaja tlakovi kreću između 50 i 80 bara. Membrane se izrađuju od različitih polimernih materijala i slažu se u module u obliku spiralnog namotaja.

Za rad uređaja potrebna je stapna triplex-pumpa koja preko prefiltra usisava balastnu vodu iz tanka. Triplex-pumpa tlači vodu tlakom od oko 50 bara kroz module polupropusnih membrana. Organizmi i čestice ostaju s jedne strane membrane, a pročišćena voda prolazi kroz slojeve membrana i odvodi se do troputnog ventila. Troputni je ventil povezan s uređajem za nadzor rada i propušta vodu natrag u tank ako se u vodi koja prođe kroz membranu ustanovi veći broj čestica od one na koju je uređaj ugođen. Regulacijskim ventilom regulira se tlak i kapacitet uređaja. Viši tlak znači i veći kapacitet, ali, naravno, i veću mogućnost prolaska čestica i organizama kroz membranu.

Veliki nabavni troškovi i troškovi održavanja ograničavaju primjenu ovakvih uređaja za obradu brodskega vodenog balasta (Owen et al.). Ipak se ti troškovi sve većom primjenom polako smanjuju i neki istraživači preporučuju ugradnju antiosmotskih uređaja na *cruisere* (Carless¹²). Putnički brodovi imaju relativno mali kapacitet balasta, zato kod njih mali kapacitet i dugo trajanje obrade balasta nisu od većeg značenja.



Slika 4. Reverzibilno osmotski uređaj

Figure 4. Reverse osmosis system

¹¹ Ž. Kurtela, Reverzibilno osmotski desalinizatori, Naše more, 43 (3-4), Dubrovnik, 1996.

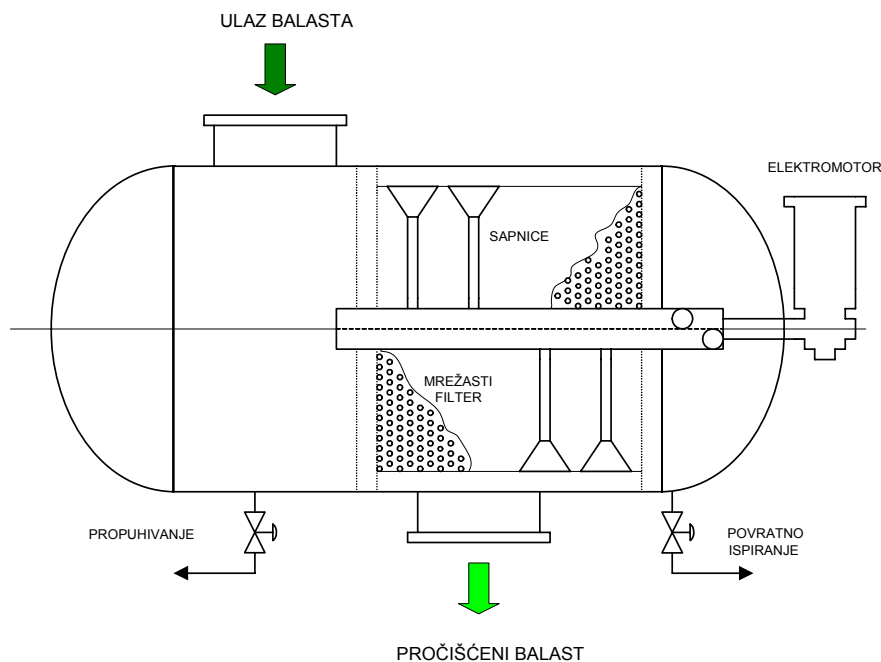
¹² P.R. CARLESS, The Application of Combined Membrane Separation and Electrolytic Chlorination Process for the Treatment of Ships' Ballast Water, Engineering Council Examination Project Report, 1998.

2.1.5. Ispitivanja efikasnosti filtracije

2.1.5. Filtering efficiency testing

Velik doprinos vrednovanju efikasnosti metoda filtracije dali su rezultati istraživanja pilot-uređaja za obradu vodenog balasta na Velikim jezerima.¹³ Ispitivanja su obavljena na brodu za prijevoz rasutih tereta „M.V. Algonorth“ i na barži u luci Duluth na jezeru Superior. Ispitivanja su se obavljala na automatskom samočistivom mrežastom filtru kapaciteta od 340 m³/h koji je primarno razvijan radi zaštite hidroelektrana na Ontariju od školjkaša *Dreissena polymorpha* Pallas.

Na učinkovitost filtracije utječu plastičnost i elastičnost organizama. Pojedini organizmi mogu se prilagoditi i prolaziti bez oštećenja kroz filtre iako su njihove dimenzije veće od njihovih pora. Organizmi u stadiju jajašca ili ličinki mogu također pokazati elastičnost i plastičnost, ali nema vjerodostojnih podataka o njihovu preživljavanju. Prema Mundayjevima¹⁴ istraživanjima za plankton *Asterias amurensis*, koji je veći od 100 µm, zbog plastičnosti i elastičnosti preporučuje se veličina filtara od 50 µm.



Slika 5. Samočistivi mrežasti filter s povratnim ispiranjem

Figure 5. Selfcleaning conventional filter with back flushing

Za 50 µm mrežaste filtre djelotvornost se kretala između 82 i 95%. Povećana efikasnost uočena je nakon prvih dana testiranja jer je došlo do formiranja taloga na filtru, koji je zapravo povećao efikasnost. Na manje propusnom filtru od 25 µm efikasnost je bila između 74 i 94%. Ispitivanja na barži pokazala su efikasnost filtra finoće 25 i 50 µm veću od 80%. Filtri veličina između 100 i 150 µm pokazali su se manje uspješnim od onih finoće 25 i 50 µm.

Kod fitoplanktona efikasnost se mijenja ovisno o strukturi alga. Efikasnost za alge kretala se oko 90 % s 50 µm filtrom i oko 94% s 25 µm filtrom. Sve upotrebene veličine filtara pokazale su se neefikasnim za bakterije i organizme manje od 20 µm.

Mrežasti samočistivi filtri su pogodni za primarno odstranjivanje organizama (u prvom stupnju obrade) ili kao priprema za drugi stupanj obrade. Kada se rabe samo za primarnu obradu, preporučljiva veličina otvora mrežice je u rasponu od 50 do 100 µm. Ispitivanja na barži pokazuju da je pri primarnoj obradi donja granica finoće filtra 50 µm. Istina je da se s manjim veličinama postiže veća efikasnost; međutim, gubitci izazvani sporijim protokom kroz filter znatno se povećavaju.

¹³ A. CANGELOSI, *Great Lakes Ballast Technology Demonstration Project*, 2001.

¹⁴ B. MUNDAY et. al., *An Biological and Epidemiological Review of Putative Ballast Water Introduction Undaria pinnatifida and Asterias amurensis*, AQIS BWRs Report No. 3, 1993, p. 239-287.

Tablica 1. Prikaz veličina organizama koji mogu biti u balastnoj vodi

Table 1. Size of organisms which may be present in ballast waters

Vrsta organizma	Prosječna veličina organizma [µm]
Virusi	0,02 – 1
Bakterije	
tipična veličina	0,5 – 5
<i>Vibrio cholerae</i>	0,2 – 1,5
<i>Vibrio spp.</i>	(0,5 – 0,8) x (1,4 – 2,6)
<i>Aeromonas salmonicida</i>	0,6 x 1
<i>Renibacterium salmoninarium</i>	(0,3 – 1) x (1 – 1,5)
<i>Yersinia spp.</i>	0,5 – 1 x (1 – 2)
Protozoa (praživotinje)	
tipične veličine	2,6 – 30
<i>Perkinsus marinus</i>	2 – 100
Alge kremenjašice	
vegetativne stanice i spore	3 - 115
Dinofalgelati	
tipični oblici	20 – 200
<i>Phiesteria piscicida</i>	5 - 250

Izvor: OEMCKE D.: *The Treatment of Ships' Ballast Water, Eco Ports Monograph Series No. 18, Brisbane, 1999.*

2.1.6. Ponašanje samočistivih filtara u radu

Behaviour of self cleaning filters during operation

Pri uporabi filtara za primarnu obradu potrebno je obratiti pozornost na sljedeće:

- Poželjno je na ulazu u filter ugraditi mrežastu rešetku u rasponu od 5 do 10 mm kako bi se zaštitila znatno finija mrežica samočistivog filtra.
- Automatsko povratno ispiranje omogućuje rad filtara bez nadzora posade. Nažalost, povratno ispiranje smanjuje protok kroz filter i povećava pad tlaka u cijelom balastnom sustavu.
- Ventil za održanje tlaka potreban je na izlazu pročišćene faze kako bi se za vrijeme trajanja povratnog ispiranja mogla održavati razlika između tlakova u izlaznoj komori i komori povratnog ispiranja.
- Interval i dužinu trajanja povratnog ispiranja potrebno je mijenjati ovisno o koncentraciji organizama i čestica u balastnoj vodi.
- Za veće jedinice potrebna je dodatna obuka posade.
- Prilikom odabira filtra treba uzeti u obzir njegovu kompatibilnost s postojećim brodskim balastnim sustavom.

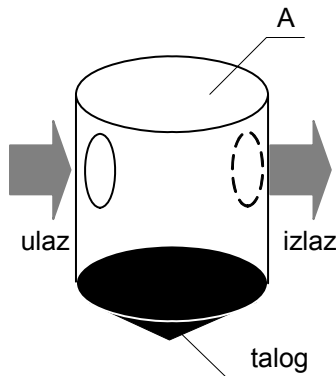
Za filter veličine mrežice od 100 µm kapaciteta 350 m³/h pad tlaka kroz filter (čist filter) iznosi oko 0,14 bara. Povratno ispiranje automatski započinje kada razlika tlaka (Δp) između ulaza i izlaza naraste na 0,2 do 0,28 bara. Koliko često će doći do te razlike tlaka, ovisi o količini čestica i organizama u balastnoj vodi. Radi sprječavanja začepljivanja fine mrežice, talog se može uspješnije odstranjivati ugradnjom posebne pumpe (tlaka 4 – 5 bara) za povratno ispiranje.

Automatski samočistivi filtri imaju od svih navedenih tipova filtara najviše izgleda za uporabu u primarnoj obradi brodskega vodenog balasta. Finoćom mrežice odabire se i veličina organizama i čestica koje se odstranjuju. Mogu raditi bez nadzora posade i učinkoviti su u otklanjanju zamućenosti balastne vode i suspenziranih čestica.

četiri puta brža od sedimentacije i pri tome zahtijeva manju površinu tanka ili bazena. Međutim, cijena je instalacije veća zbog sustava za ubrizgavanje zraka, a prilikom rada na površini tanka zamućuje se tekućina. Pri ovoj metodi pročišćeni se balast odvodi s dna tanka, a slojevi s površine tanka odstranjuju se posebnim „češljevim“a. Procjena brzine u procesu flotacije (v_{flot}) ovisi o vrsti flotacije i sastavu čestica koje se uklanjaju.

2.2. Sedimentacija

2.2. Sedimentation



Slika 6. Proces sedimentacije

Figure 6. Sedimentation process

Sedimentacija ili taloženje odvija se u tanku uz pomoć gravitacije. Teže čestice, sedimenti i većina organizama s vremenom padaju na dno tanka. Kako sve čestice i organizmi nisu teži od vode, potrebno je dodavati sredstva za zgrušavanje, tj. koagulate. Oni vezuju i skupljaju manje čestice u veće, pospješujući njihovo padanje na dno tanka. Obradena se voda uvijek usisava pri vrhu tanka, a sedimenti i organizmi periodički se prazne s njegova dna pripadajućim cjevovodom.

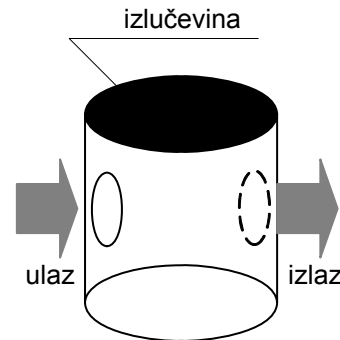
$$v_{sed} = q/A\rho \quad (2)$$

Brzina procesa sedimentacije (v_{sed}) upravo je proporcionalna masenom protoku tekućine (q), a obrnuto je proporcionalna umnošku gustoće tekućine (ρ) i površine poprečnog presjeka posude (A) [25].

2.3. Flotacija

Flotation

Flotacija ili isplutavanje osniva se na ubrizgavanju malih mjehurića zraka pri ulasku balastne vode u tank. Nakon ubrizgavanja zraka u proces se dodaje sredstvo za zgrušavanje koje se vezuje za čestice, tj. organizme i zrak. Novonastale "pahuljice" imaju manju gustoću od balastne vode i isplutavaju na površinu tanka. Flotacija je učinkovita za odstranjivanje alga. Ova je metoda tri do

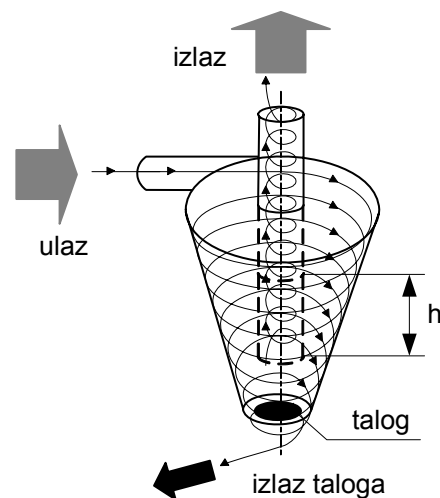


Slika 7. Flotacijski proces

Figure 7. Flotation process

2.4. Hidrociklonska separacija

Hydrocyclonal separation



Slika 8. Proces hidrociklonske separacije

Figure 8. Hydrocyclonal separation process

Hidrociklonski separatori nemaju rotacijskih dijelova i sastoje se od središnje jezgre (kućišta) spiralna oblika, koja se konusno sužava prema jednom kraju. Energija strujanja vode kroz sužene presjeke kućišta hidrociklona uzrokuje stvaranje vrtloga. Načelo rada osniva se na ubrzanju čestica i odvajanju lakše faze od teže zbog razlike gustoća. Tangencijalnim uvođenjem balastne vode pod tlakom u gornji dio hidrociklona postiže se naniže usmjereno, centrifugalno rotacijsko strujanje (vanjski

vrtilog). Zbog konusnog oblika donjeg dijela vrtlog se koči pa raste tlak neposredno iznad donjeg izlaza, tako da se tu otkidaju strujni slojevi i usmjeruju u suprotnom smjeru, centralno naviše, prema području nižeg tlaka (unutrašnji vrtlog). Na tome mjestu - u području nižeg tlaka postavlja se izlazna cijev kojom se pročišćeni balast izvodi van (slika 8.).

Vrtložnim strujanjem kroz hidrociklon centrifugalna će sila potisnuti organizme i sediment, zbog njihove veće mase, prema stijenci hidrociklona. Oni će kliziti niz stijenkicu i konačno biti izbačeni kroz donji izlaz. Lakša faza, pročišćeni balast zbog manje mase ostaje u središnjem dijelu, gdje se, zahvaćena unutarnjim vrtlogom, izvodi kroz gornji izlaz. Morska voda i organizmi koji se u njoj nalaze nemaju istu gustoću. Primjer su ciste dinoflagelata koje imaju gustoću veću od $1,1 \text{ kg/dm}^3$. One se zato mogu hidrociklonom odvojiti iz balastne vode. Uz to pretpostavlja se da velik broj organizama ne može preživjeti tretman zbog velikih ubrzanja koja se pojavljuju prilikom prolaska morske vode kroz hidrociklone.

$$v_{\text{cikl}} = Qg\rho k_p / 4h\Delta p \quad (3)$$

Brzina procesa hidrociklonske separacije (v_{cikl}) upravo je proporcionalna protoku tekućine (Q), gustoći tekućine (ρ) i koeficijentu pada tlaka kroz ciklon (k_p), sve pomnoženo gravitacijom (g), dok je obrnuto proporcionalna visini usisne zone unutar ciklona (h), padu tlaka unutar ciklona (Δp), sve pomnoženo s 4 [27].

2.4.1. Primjena hidrociklona na brodu

Application of hydrocyclons to ships

Balastna voda pod tlakom ulazi u širi dio konusne jezgre gdje raste centrifugalna sila i naglo dolazi do velikog porasta ubrzanja. Na izlazu iz hidrociklona lakša faza (pročišćeni balast) formira se oko središnje jezgre, dok se teža faza (organizmi, sedimenti) nalazi na vanjskom dijelu sekcije. Svaka se faza odvodi pripadajućim ventilima i cjevovodom izvan broda ili prema balastnim tankovima (slika 9.). Izbacivanjem teže faze gubi se 5 – 10 % ulazne količine balasta u hidrociklon. Pad tlaka u hidrociklonu je oko 0,8 bara. Radi

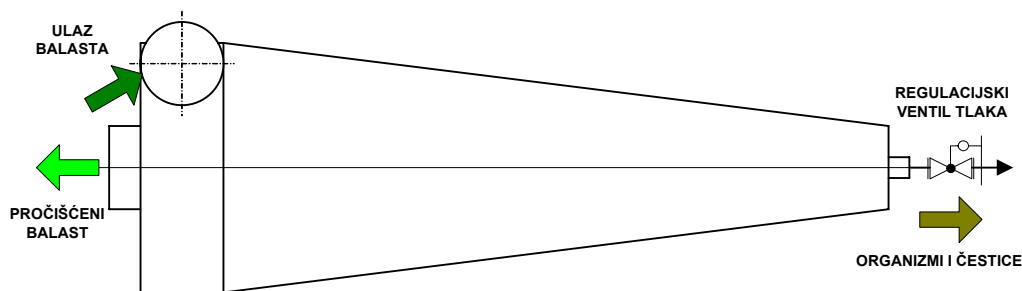
osiguranja dostatnog povratnog tlaka koji je potreban da bi se teža faza izbacivala iz hidrociklona, potrebno je ugraditi regulacijski ventil povratnog tlaka (BVP-ventil). Kad su balastni tankovi prazni, BVP-ventil se ugađa na 1,2 – 1,5 bara iznad ulaznog tlaka u hidrociklon. Prilikom balastiranja broda razine balasta u tanku i vodne linije broda se mijenjaju pa se smanjuje Δp . Pri smanjenju Δp BVP-ventil se postupno otvara. Kad se razine izjednače, BVP-ventil je potpuno otvoren i takav ostaje za vrijeme dopunjavanja svih balastnih tankova.

2.4.2. Ponašanje hidrociklona u radu

Behaviour of hydrocyclones during operation

Prilikom ugradnje hidrociklona na brod potrebno je voditi računa o sljedećem:

1. Hidrociklon treba biti postavljen u što je moguće vertikalnijem položaju, s ulazom balastne vode na vrhu. Ako to nije zbog ograničenja prostora moguće, može se postaviti s manjim nagibom ciklonske osi od vertikale, a učinak će biti manji što je taj nagib veći.
2. Na ulazu balastne vode preporučuje se postaviti mrežasti filter veličina od 6 do 12 mm kako bi se odstranili veći organizmi i čestice.
3. Gravitacijsko balastiranje tankova dvodna nije moguće preko hidrociklona jer se ne ostvaruje potrebni radni tlak za izbacivanje teže faze.
4. Upotreblijivi su samo pri balastiranju broda, kad se odstranjeni organizmi i čestice vraćaju natrag u isto more.
5. Mogu se koristiti za brodske balastne sustave najvećih kapaciteta. Željeni kapacitet postiže se ili jednim (većim) hidrociklonom ili sustavom manjih hidrociklona. Pri ugradnji sustava manjih hidrociklona mogu se ugrađivati različiti tipovi od kojih je svaki optimiziran za odstranjivanje različitih veličina čestica.



Slika 9. Hidrociklonski separator za pročišćivanje balastne vode

Figure 9. Hydrocyclonal separator for ballast water separation

Prva istraživanja primjene hidrociklonske separacije za obradu brodskog vodenog balasta obavljena su na pilot-postrojenjima kapaciteta od 55 m³/h (Cangelosi et al.¹⁵). Rezultati nisu bili ohrabrujući jer je postignuta mala efikasnost pri odstranjivanju organizama. Na poboljšanom hidrociklonu dužine 5 m i kapaciteta 100 m³/h, pri radnom ulaznom tlaku od 2 bara efikasnost je za ciste račića *Artemie* iznosila 13,7%, za dinoflagelata *Porocentrum minimum* i zelenu algu *Tetraselmis sp.* 10 – 30 %, dok je odstranjivanje bakterija bilo zanemarivo (Jelmert¹⁶).

Iako se hidrociklonskom separacijom ne može postići velika efikasnost odstranjivanja organizama, ova je metoda prikladna kao primarna obrada umjesto filtracije. Pri obradi filtracijom pojavljuju se gubitci protoka balastne vode i gubitci na vremenu zbog čišćenja filtra. Nasuprot tome hidrocikloni, koji nemaju nikakvih pokretnih dijelova, imaju male gabarite, zanemarivo održavanje i nisku nabavnu cijenu, čine se pogodnima za ugradnju na brodove. Sadašnja tehnologija omogućuje kapacitete postrojenja do 3.000 m³/h, što znači da se hidrocikloni mogu izravno povezivati s balastnim pumpama velikih tankera i bulkariera.

Američki proizvođači proizvode ultrahidrociklone kojima se postiže ubrzanje veće od 100 g. Istraživanja bi trebalo usmjeriti na ispitivanja učinkovitosti ovakvih uređaja. Jedina poznata upotreba hidrociklona na brodu je na C/S „Regal Princes“. Uređaj je kapaciteta od 200 m³/h i koristi se kao primarna obrada prije UV-zračenja.

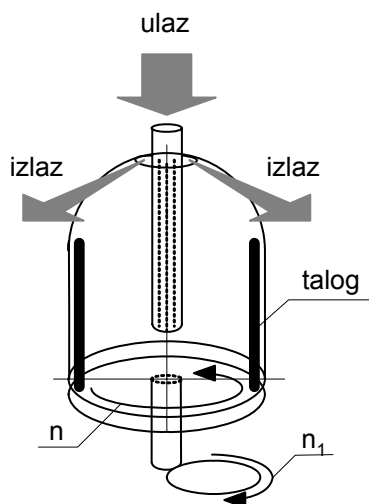
Hidrociklonska separacija može omogućiti uspješnu obradu brodskoga vodenog balasta u prvom stupnju obrade. Prednosti se očituju u pouzdanosti, zanemarivim troškovima održavanja i mogućnosti izravnog povezivanja na postojeće brodske balastne sustave. Čestice i organizmi koji se odstranjuju većinom su oni koji mogu izazvati oštećenja uređaja drugog stupnja obrade predviđenih za odstranjivanje manjih organizama. Prema rezultatima istraživanja u Velikim jezerima¹⁷ osim neefikasnosti odstranjivanja virusa i bakterija ovom metodom nije moguće smanjiti zamućenost, što treba uzeti u obzir prilikom izbora metode drugog stupnja obrade.

2.5. Centrifugalna mehanička separacija

Centrifugal mechanical separation

Centrifugalnom separacijom mogu se postići slični rezultati odvajanja organizama i sedimenata iz balastne vode kao pri hidrociklonskoj separaciji. Konstrukcija centrifugalnih separatora je dosta složenija u usporedbi s hidrociklonima zbog rotirajućih dijelova separatora koji dostižu brzine od 6.000 do 8.000 min⁻¹. Centrifugalni separatori na mehanički pogon obično se koriste

elektromotorima koji se pužnim prijenosnicima reduktora i tarnom spojkom povezuju s rotirajućim bubnjem. Rotirajući bubanj sastoji se od većeg broja slogova konusnih tanjura koji se okreću zajedno s bubnjem. Tekućina u separator dolazi kroz cijev postavljenu u središtu rotacije, koja završava pri dnu separatora. Nakon separacije laka faza izlazi pri vrhu separatora, dok teška faza (talog) ostaje na periferiji bubnja separatora (slika 10.). Talog se periodički izbacuje iz bubnja u posebni tank.



Slika 10. Proces centrifugalne mehaničke separacije

Figure 10. Centrifugal mechanical separation process

Centrifugalni separatori ne mogu se zbog svog malog kapaciteta (2 – 4 m³) povezivati izravno s balastnim pumpama na brodu. Njihova primjena ograničena je na kopnena postrojenja ili na recirkulaciju balasta u manjim balastnim tankovima tijekom putovanja broda.

$$v_{sep} = (\rho - \rho_1)d^2\omega^2r/18\eta \quad (4)$$

Brzina procesa centrifugalne separacije (v_{sep}) upravo je proporcionalna razlici gustoće čestice (ρ) i gustoće tekućine (ρ_1), kvadratu promjera čestice (d), kvadratu obodne brzine bubnja separatora (ω) i radijusu bubnja separatora (r), a obrnuto je proporcionalna dinamičkom viskozitetu tekućine (η) pomnoženom brojem 18 [26].

Učinkovitost mehaničkih centrifugalnih separatora je dobra, i kod vodećih svjetskih proizvođača tih uređaja (Alfalaval, Westfalia i Mitsubishi) nakon separiranja u manjoj mjeri ostaju samo najfinije čestice veličine tek nekoliko μm .

2.6. Centrifugalna dinamička separacija

Centrifugal dynamical separation

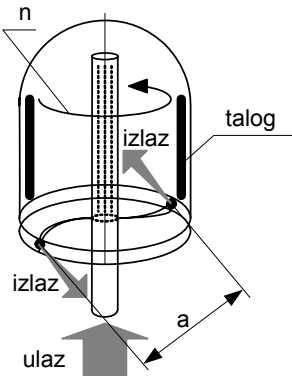
Centrifugalna dinamička separacija osniva se na odjeljivanju tekuće i čvrste faze unutar bubnja koji rotira bez vanjskog pogona, iskorištavajući energiju tekućine.

¹⁵ A. CANGELOSI, I. KNIGHT, M. BLACER, *Bioeffectiveness of automatic backwash filtration as a ballast water treatment measure*, Great Lake Ballast Technology Demonstration Project, 2001.

¹⁶ A. JELMERT., Preliminary results a pilot study on treatment for ballast water with vortex separation and UV radiation. Report of the ICES/IOC/IMO Study group on Ballast Water and Sediments, The Hague, 1999.

¹⁷ Design Study Report, Full Scale Design Studies of Ballast Water Treatment Systems, Northeast-Midwest Institute, Washington DC, 2002.

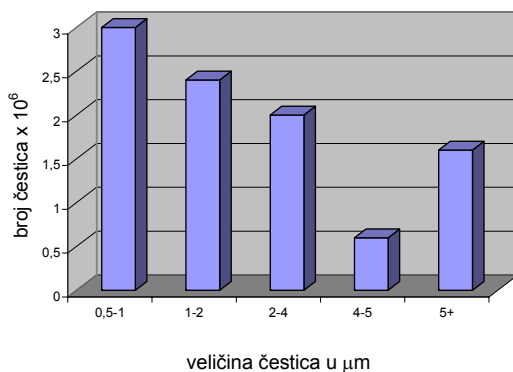
Tekućina pod tlakom ulazi s donje strane bubnja kroz šuplju osovinu, ispunja unutrašnjost bubnja i izlazi kroz dvije mlaznice postavljene u istoj ravnini, ali suprotno usmjerene (slika 11.). Prolaskom kroz mlaznice brzina se tekućini povećava i stvaraju se sile suprotno usmjerene i udaljene za krak a . Nastali spreg sila rotira bubanj separatora stvarajući centrifugalnu silu potrebnu za odjeljivanje teške faze (taloga). Talog se kupi na periferiji bubnja i periodički čisti nakon zaustavljanja separatora. Prednost dinamičkog separatora u usporedbi s mehaničkim je znatno jednostavnija konstrukcija. Kapacitet ovog separatora je ograničen kao i kapacitet mehaničkog separatora.



Slika 11. Proces centrifugalne dinamičke separacije

Figure 11. Centrifugal dynamical separation process

Iako, zasad, nisu objavljeni podaci o uporabi ovih separatora za pročišćivanje brodskog vodenog balasta, oni su svakako zanimljivi za upotrebu. Rezultati istraživanja provedenih na viskoznim tekućinama su ohrabrujući, i broj okretaja bubnja za tekućinu koja ulazi pod tlakom od 2,5 bara dostiže čak 7.500 o/min.



Grafikon 1. Odnos broja čestica i njihove veličine pri centrifugalnoj dinamičkoj separaciji [23]

Graph 1. Number and size of particles relation in centrifugal dynamical separation [23]

U grafikonu 1. predložen je odnos broja i veličine čestica u talogu centrifugalnog dinamičkog separatora.

Dominira broj najfinijih čestica, što svakako upućuje na učinkovitost separatora. Broj odijeljenih čestica smanjuje se s njihovom veličinom, uz iznimku čestica

većih od 5 μm . Iako na rezultate prikazane u grafikonu utječu viskoznost separirane tekućine i stupanj onečišćenja, koji su drugačiji nego za brodski vodeni balast, sve upućuje na istraživanje mogućnosti korištenja ovim uređajima za potrebe separacije balastne vode.

Zaključak

Conclusion

Primarni procesi u obradi brodskoga vodenog balasta ne mogu se primjenjivati kao samostalna metoda obrade. Ove metode ne mogu odstraniti viruse i bakterije, zato se moraju rabiti samo kao primarna obrada. Međutim, ovim metodama moguće je uspješno ukloniti veće organizme i čestice koje bi u drugom stupnju obrade mogle izazvati teškoće u radu sustava za obradu.

Automatski samočistivi filtri i hidrociklonski separatori zbog svojih gabarita, mogućnosti direktnog povezivanja s postojećim balastnim sustavima, automatskog rada i jednostavnog održavanja imaju prednost pred ostalim navedenim mehaničkim metodama.

Hidrocikloni u usporedbi s automatskim samočistivim filtrima imaju manje gubitke protoka, jednostavniji su i lakši za održavanje, i imaju nižu nabavnu cijenu. Prema dinamičkom načelu rada slični su hidrociklonima centrifugalni dinamički separatori, kod kojih, za razliku od hidrociklona, bubanj u separatoru rotira.

Literatura

References

- [1] L. KARAMINAS, *An Investigation of ballast water management methods with particular emphasis on the risk of the sequential method*, Lloyd's register of Shipping, London, 2000.
- [2] A. TAYLOR, G. RIGBI, *Suggested Design to Facilitate Improved Management and Treatment of Ballast Water on New and Existing Ship*, Alan H. Taylor Associates Pt, Victoria, 2001.
- [3] C. MCGAHEY, V. OLIVIERI, *Mechanisms of Virtual Capture by Microfiltration*, Water Science and Technology 27, 1993.
- [4] G. OWEN, M. BANDI, J.A. HOWELL, *Economic Assessment of Membrane Processes for Water and Waste Water Treatment*. Journal of Membrane Science 102, 1995.
- [5] A. CANGELOSI, *Great Lakes Ballast Technology Demonstration Project*, 2001.
- [6] A. CANGELOSI, I. KNIGHT, M. BLACER, *Bio effectiveness of automatic backwash filtration as a ballast water treatment measure*, Great Lake Ballast Technology Demonstration Project, 2001.
- [7] B. MUNDAY, M. DAINTH, J. C. SANDERSON, *An Biological and Epidemiological Review of*

- Putative Ballast Water Introduction *Undaria pinnatifida* and *Asterias amurensis*, AQIS BWRS Report No. 3, 1993.
- [8] A. JELMERT, Preliminary results a pilot study on treatment for ballast water with vortex separation and UV radiation. Report of the ICES/IOC/IMO Study group on Ballast Water and Sediments, The Hague, 1999.
- [9] G. RIGBY, A. TAYLOR, *Technical and Cost Effectiveness of Ballast Water Management and Treatment Option*, Alan H Taylor Associates Pt, Victoria, 2001.
- [10] D. OEMCKE, The Treatment of Ships' Ballast Water, Eco Ports Monograph Series No. 18, Brisbane, 1999.
- [11] I. KRIESEL, Y. KOLODNY, W. L. CRAINS, The Ternary effect for ballast water treatment, 2nd International Ballast Water Treatment R&D Symposium IMO, London, 2003.
- [12] D.A. WRIGHT, R. DAWSON, T.P. MACKEY, H.G. CUTLER, Some Shipboard Trials of Ballast Water Treatment Systems in the United States, 2nd International Ballast Water Treatment R&D Symposium IMO, London, 2003.
- [13] A. KORMUELLER, Development and Design of Process Modules for Ballast Water Treatment on Board, 2nd International Ballast Water Treatment R&D Symposium IMO, London, 2003.
- [14] S. SMITH, Ballast Water Treatment – Management and Research in Washington State, 2nd International Ballast Water Treatment R&D Symposium IMO, London, 2003.
- [15] J.T. CARLTON, Transoceanic and Interoceanic Dispersal of Coastal Marine Organisms, The Biology of Ballast Water, Oceanography and Marine Biology Annual Review 23, 313 – 374.
- [16] AQIS, Australian Ballast Water Management Guidelines, Australian Quarantine and Inspection Service, 1988.
- [17] AQIS, Australian Ballast Water Management Requirements, Australian Quarantine and Inspection Service, 2001.
- [18] S. KAWAMURA, *Integrated Design of Water Treatment Facilities*, John Wiley & Sons, 1991.
- [19] J. MALLEVIALLE, P.E. ODENAAL, M.R. WIESNER, *Water Treatment Membrane Processes*, American Water Work Association, Lyonnaise des Eaux & Water Research Commission of South Africa, 1996.
- [20] P.R. CARLESS, *The Application of Combined Membrane Separation and Electrolytic Chlorination Process for the Treatment of Ships' Ballast Water*, Engineering Council Examination Project Report, 1998.
- [21] Ž. Kurtela, Reverzibilno osmotski desalinizatori, *Naše more*, 43 (3-4), Dubrovnik, 1996.
- [22] Design Study Report, Full Scale Design Studies of Ballast Water Treatment Systems, Northeast-Midwest Institute, Washington DC, 2002.
- [23] M.E. Backhouse, D.C. Purcell, Cleaning of lubricating oil - The needs of the future, Leading through innovation Symposium, paper 5, Indianapolis, 1995.
- [24] *Tehnička enciklopedija*, svezak 5, Filtracija, p. 400, Leksikografski zavod, Zagreb, 1976.
- [25] *Tehnička enciklopedija*, svezak 12, Sedimentacija, p. 47, Leksikografski zavod, Zagreb, 1992.
- [26] *Tehnička enciklopedija*, svezak 2, Centrifugiranje, p. 590, Leksikografski zavod, Zagreb, 1966.
- [27] V. Koharić, *Uvod u mehaničke operacije*, Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva I brodogradnje, Zagreb, 1989.

Rukopis primljen: 18.2.2005.