

RAZVOJ NAPRAVE ZA OBDELAVO BALASTNIH VODA NA PLOVILIH S HIDRODINAMSKO KAVITACIJO

DEVELOPMENT OF A HYDRODYNAMIC CAVITATION SYSTEM FOR THE TREATMENT OF BALLAST WATER ON SHIPS

Martina Cvetković, mag. ing. pp. tp.
prof. dr. Franci Steinman, univ. dipl. inž. grad.

Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo
Hajdrihova 28, 1000 Ljubljana

Znanstveni članek

UDK 532.5:574.583(26.04)(497.4)

Povzetek | Eden glavnih načinov prenosa invazivnih tujerodnih vrst med vodnimi ekosistemi po svetu so balastne vode, zato želimo z različnimi sistemi za obdelavo balastnih voda zmanjšati njihov negativni vpliv oziroma preprečiti širjenje invazivnih organizmov, ki so v njih. Merila za določanje učinkovitosti sistemov so pripravljena v okviru Mednarodne konvencije za nadzor in ravnanje z ladijskimi balastnimi vodami in sedimenti, ki pa še ni začela veljati. Ena od možnosti čiščenja balastnih voda so naprave s hidrodinamsko kavitacijo, v katerih se v glavnem elementu naprave ustvari nenadno zmanjšanje lokalnega tlaka, ki poškoduje ali uniči organizme v pretakajoči se balastni vodi. Predstavili bomo razvoj nove naprave, ki je pri ustvarjanju hidrodinamske kavitacije učinkovitejša kot obstoječe naprave, ki uporabljajo isti proces obdelave vode. S hidravličnimi poskusi smo najprej razvili novo zasnovo z intenzivnim tvorjenjem kavitacije, nato so sledili biološki poskusi z morskovo vodo iz Piranskega zaliva, s katerimi smo preverili še učinek kavitacijske obdelave na morske organizme. Ta je bil ovrednoten z doseženo stopnjo poškodovanosti treh ciljnih morskih organizmov. Preverili smo tudi, ali bi lahko s separacijo, kot predobdelavo morske vode, učinek naprave še izboljšali. Rezultati primerjave kažejo večjo učinkovitost nove naprave na vseh testiranih organizmih in boljše obratovalne lastnosti od obstoječih kavitacijskih sistemov.

Ključne besede: invazivne vrste, balastne vode, Mednarodna konvencija za nadzor in ravnanje z ladijskimi balastnimi vodami in sedimentom, hidrodinamska kavitacija, zooplankton, morske bakterije

Summary | Ballast water is one of the most important ways of the transfer of invasive foreign species between the worldwide aquatic ecosystems. With the aim of preventing and decreasing the extent of the spread of invasive organisms, and in accordance with the International Convention for the Control and Management of Ships' Ballast Water and Sediments, different systems for ballast water treatment have so far been developed. Based on a review of existing technologies and their limitations three new designs of hydrodynamic cavitation pilot systems have been developed and consequently optimised. The aim of this investigation was to use hydrodynamic cavitation as the main step in the treatment process and to apply the process of separation as a pre-treatment of ballast water treatment, but only if necessary. In the first phase of the experiments a pilot system, which showed the highest hydraulic efficiency for generating hydrodynamic cavitation, was developed. The aforementioned pilot system was

then chosen in the second, i.e. biological phase of the experiments, the aim of which was to determine the performance of ballast water treatment. The specific criterion for this step was the extent of the destruction of the aimed marine organisms. The results of the biological experiments confirmed that the newly developed system shows a high efficiency on all tested organisms.

Keywords: invasive species, ballast water, International Convention for the Control and Management of Ships' Ballast Water and Sediments, hydrodynamic cavitation, zooplankton, marine bacteria

1 • UVOD

Pri tovorni plovbi je zajem balastne vode pogost spremljajoči pojav. Če je plovilo dovolj obremenjeno s tovorom, balast ni potreben, saj tovar zagotavlja stabilnost. Pri plovbi delno polnega ali celo praznega plovila, še posebno v težkih vremenskih razmerah, pa mora plovilo zajeti balastno vodo, da zagotovi stabilnost, zmanjša velikost nagibanja in izboljša ohranjanje smeri plovbe. Ko balastne vode niso več potrebne, se iz plovila izpuščajo v pogosto drugačno okolje, z njimi pa tudi različni organizmi z drugih lokacij. Zato so balastne vode, poleg obrasti na ladijskih trupih in ribogojstva, poglaviti vir oz. način prenašanja tudi invazivnih tujerodnih vrst med različnimi vodnimi ekosistemi po svetu (slika 1) (David, 2013). Invazivna tujerodna vrsta (ITV, angl. non-indigenous species (NIS) oz. invasive alien species (IAS)) je opredeljena za tisto vrsto, ki se pojavi zunaj svojega naravnega okolja, v novem okolju pa njena naselitev in širjenje ogrožata obstoječo biotsko raznovrstnost (ekosisteme, habitate ali vrste) in/ali zdravje ljudi, lahko pa tudi gospodarske dejavnosti. Za Sredozemsko morje in ob tem za Jadransko morje je bilo na seznamu ITV uvrščenih že več kot 980 neavtohtonih vrst, vendar je med njimi le 12 vrst, ki so neposredno povezane z ladijskim prevozom. Domnevamo pa, da bi bilo lahko pomorstvo zaradi balastnih voda oz. zarasti na ladijskih trupih izvor še nadaljnjih 300 tujerodnih vrst, uvrščenih na ta seznam (Zenetos, 2012).

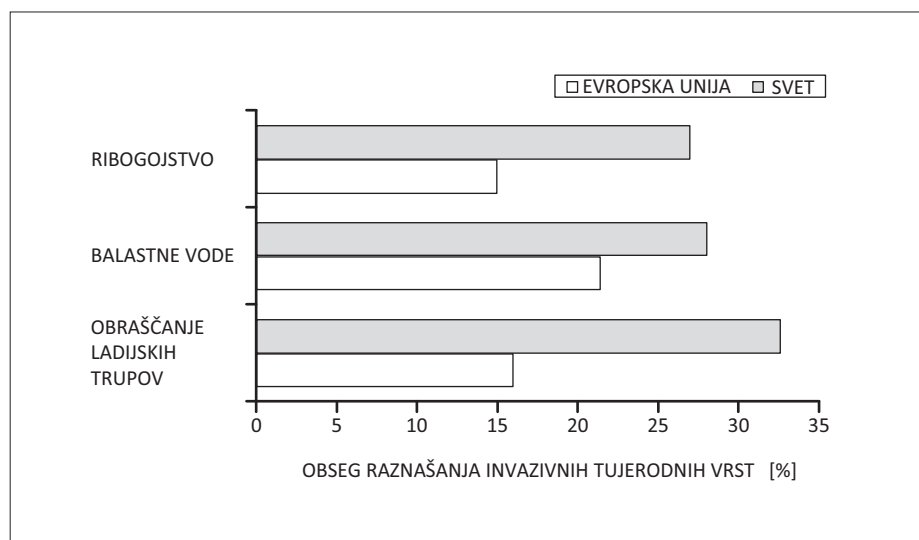
Skupna količina letnih izpustov balastnih voda je bila za leto 2013 ocenjena na približno 3,1 milijarde ton (David, 2014). V njih so doslej zaznali vsaj 10.000 različnih organizmov (Faimali, 2006), med katerimi so tudi različni tujerodni organizmi, kot so vretenčarji, nevretenčarji, rastline, mikroskopske alge in bakterije ((Ruiz, 2000), (Khandeparkar, 2013)). Z večanjem obsega plovbe postaja širjenje organizmov z balastnimi vodami vse bolj nepovraten proces, ki pogosto negativno

vpliva na avtohtone vodne ekosisteme ((Gollasch, 2007), (Kang, 2010)), hkrati pa so balastne vode vir nevarnosti tudi zaradi prisotnih človeških patogenov, kot je npr. *Vibrio cholerae* (Seiden, 2014).

Da bi zmanjšali vir nevarnosti zaradi ITV, je Mednarodna pomorska organizacija (IMO – angl.: International Maritime Organisation) pripravila Konvencijo za nadzor in ravnanje z ladijskimi balastnimi vodami in sedimenti (t. i. konvencija BWM, angl.: Ballast Water Management, v nadaljevanju besedila: konvencija). Z njo želi urediti tako dovoljene načine izpuščanja balastnih voda kot tudi predpisati potrebne oz. dovoljene načine ravnanja oz. obdelave balastnih voda in z njimi povezanih sedimentov ((IMO, 2004), (Lloyd register, 2014)). Konvencija bo začela veljati eno leto po izpolnitvi pogoja, da jo ratificira najmanj 30 držav oziroma toliko držav, ki imajo skupaj vsaj 35 % tonaže svetovnega trgoveškega ladijskega prometa. Doslej je konvencijo ratifici-

ralo 49 držav, ki pa imajo skupaj le 34,82 % trgoveške ladijske tonaže (IMO, 2016), zato konvencija še vedno ni začela veljati. Tako še vedno ostaja najpogostejši način zgolj običajna zamenjava balastnih voda z ladijskim tovorom, pri čemer pa je izpust v morje nekoliko omejen z varnostnimi zahtevami in geografskimi pogoji (lokacija izpuščanja), kar pa seveda ni učinkovit način zaščite vodnih ekosistemov pred ITV.

Čeprav konvencija še ne velja, potekajo intenzivne raziskave različnih tehnologij obdelave balastnih voda, ki bi izpolnile zahteve iz standarda D-2, ki je bil pripravljen v okviru te konvencije. Cilj je, da bi čim bolj zmanjšali vnos ITV v lokalno okolje ali vsaj njihovo možnost širjenja in tako zmanjšali s tem povezana tveganja za okolje. Pregled obstoječih tehnologij oziroma raznolikost uporabljenih procesov v njih podajamo v preglednici 1, kjer je razvidno, da se v želji po večji učinkovitosti obdelave uporabljajo tudi kombinacije tehnologij. Pri slednjih je problematično dodajanje kemikalij, ki so lahko nevarne za posadko ladij ali okolje (Lloyd register, 2014).



Slika 1 • Primerjava virov invazivnih tujerodnih vrst (ITV): obrast na trupih plovil, balastne vode, vzreja morskih organizmov, vse izraženo v odstotkih za EU in za cel svet (prirejeno po (Gollasch, 2007))

PREGLED TEHNOLOGIJ ZA OBDELAVO BALASTNIH VODA			
MEHANSKI PROCES	FIZIKALNA DEZINFEKCIJA	KEMIČNA OBDELAVA	KOMBINACIJE
Filtracija Ciklonsko ločevanje (hidrocikloni) Elektromehanična ločitev	Ultravijolično obsevanje Akustična kavitacija (ultrazvok) Odzračenje (odstranitev raztopljenega kisika) Hidrodinamska kavitacija Toplotna obdelava	Elektro kloriranje/Elektroliza Biocidi Kloriranje Klorid dioksid SeaKleen Peraclean Ocean Ozoniranje Koagulacija/Flokulacija Kemična redukcija (Sulfit/Bisulfit)	Mehanski proces + fizikalna dezinfekcija Mehanski proces + kemična obdelava

Preglednica 1 • Glavne skupine tehnologij za obdelavo balastnih voda in reprezentativni procesi posamezne skupine (prirejeno po (ABS, 2011), (Lloyd register, 2014))

Pri pregledu obstoječih tehnologij smo analizirali njihovo učinkovitost ter njihove prednosti in slabosti. Ocenili smo, da bi

lahko z razvojem nove naprave s hidrodinamsko kavitacijo dosegli višjo stopnjo odstranjevanja ITV iz morske vode in

ugodnejše pogoje delovanja naprave. Rezultati intenzivnih raziskav so pokazali, da so cilji doseženi.

2 • HIDRODINAMSKA KAVITACIJA

Hidrodinamska kavitacija je fizikalni pojav, ki poteka na območjih hitrega zmanjšanja tlaka v tekoči vodi, lahko pa tudi v drugi kapljevini ((Jyoti, 2001), (Al-Jubouri, 2010)). Takšne spremembe običajno nastajajo pri naglih geometrijskih spremembah v napravi, kjer tokovne razmere v tekočini povzročijo, da lokalno tekočina preide iz tekočega v plinasto (mehurčkasto) stanje in nato nazaj v tekoče stanje (Arrajo, 2008). Pri teh pretvorbah nastanejo tlačni valovi kot posledica znatnih količin ujete energije, ki se sprošča iz razpadlega mehurčka plinaste faze. Proces je zelo intenziven in ga pogosto obravnavamo kot nezaželen pojav (Knapp, 1970), ki lahko poškoduje različne površine, kot so ladijski propelerji, črpalke, ventili in ostenje cevi ((Brennen, 1995), (Brujan, 2011)), na katerih nastaja erozija, ki jo spremljajo vibracije in hrup (Kuiper, 2012). Tipični primeri, kjer se pojavlja hidrodinamska kavitacija, so različne šobe, odprtine, Venturijeva zožitve ipd. (slika 2).

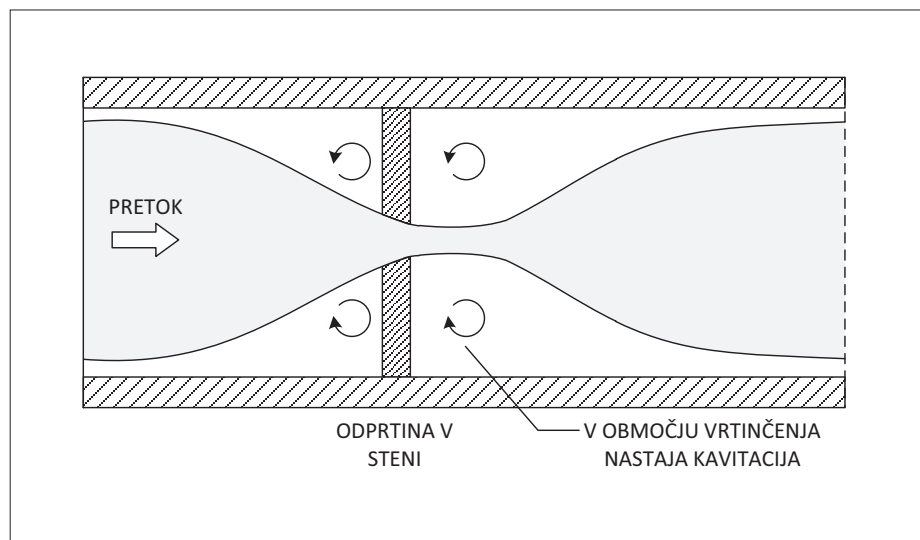
Za obdelavo balastnih voda pa smo v našem primeru hidrodinamsko kavitacijo uporabili za koristen proces, s katerim želimo doseči, da bi bili pri pretakanju balastne vode preko območja kavitacije organizmi (še predvsem ITV) poškodovani oz. uničeni v takšni meri, da se ne bi mogli obnovljati ali množiti in ne bi bili več nevarni za okolje.

Iz številnih študij lahko povzamemo, da so naprave s hidrodinamsko kavitacijo učinkovitejše pri uničevanju ITV in običajno še precej energetsko učinkovitejše v primer-

javi z napravami z akustično kavitacijo, ki jo povzroča prehod ultrazvočnih valov skozi medij ((Chivate, 1993), (Pandit, 1993)). Energetska učinkovitost pri hidrodinamski kavitaciji znaša od 54 % do 60 %, pri različnih akustičnih napravah pa le od 3 % do 43 %. Izračun učinkovitosti je opisan v literaturi ((Arrajo, 2008), (Chivate, 1993), (Jyoti, 2001), (Pandit, 1993)). Poleg energetske učinkovitosti študije prikazujejo druge prednosti hidrodinamske kavitacije pred akustično (Jyoti, 2001), kot so veliko preprostejša oprema, preprostejše vzdrževanje, enostavna nadgradnja naprave

za povečanje zmogljivosti oziroma kombiniranje z dodatno obdelavo.

Hidrodinamska kavitacija, ki uničuje celice enoceličnih ali večceličnih organizmov, je sicer že znana in razširjena metoda (npr. dezinfekcije) v različnih industrijskih procesih ((Sawant, 2008), (Brujan, 2011)). Vendar pa je doslej le nekaj avtorjev ((Kato, 2003), (Sawant, 2008), (Renade, 2009)), in še to le v laboratorijskih pogojih, raziskovalo učinkovitost hidrodinamske kavitacije pri uničevanju različnih morskih organizmov. Tudi mednarodna Uprava za vgradnjo naprav na plovila je doslej za obdelavo balastnih voda odobrila le štiri sisteme, ki uporabljajo hidrodinamsko kavitacijo ((IMO, 2014), (Lloyd register, 2014), (Cvetković, 2015)), pa še



Slika 2 • Pri hitrem toku tekočine skozi odprtino se v območju zožitve pretočnega prereza za odprtino, ki jo tvori iztekajoči curek, lahko pojavi hidrodinamska kavitacija (prirejeno po (Gogate, 2011))

ti jo uporabljajo le kot enega od procesov obdelave balastnih voda, ki se nadgradi z dodajanjem različnih kemikalij, da se poveča učinkovitost obdelave. S tem naprave sicer izpolnjujejo pogoje IMO, vendar pa zaradi do-

dajanja kemikalij negativno vplivajo na okolje (na morske organizme), so negospodarne (visoki stroški vzdrževanja, visoka poraba energije) in lahko vplivajo na varnost pri obratovanju, saj je za ravnanje z napravami in

kemikalijami potrebno posebno izobraževanje posadke (Lloyd Register, 2014). Zaradi zgornjih ugotovitev smo se odločili razviti učinkovitejšo napravo s hidrodinamsko kavitacijo.

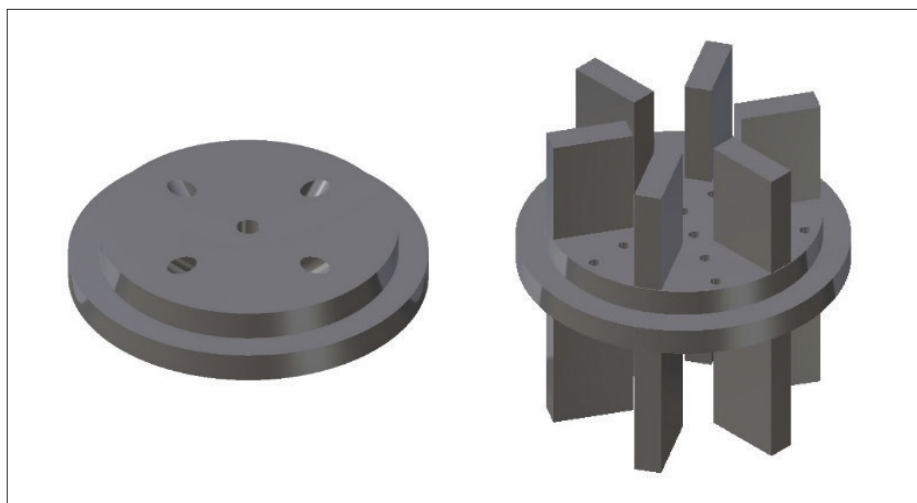
3 • RAZVOJ NOVE NAPRAVE IN EKSPERIMENTALNO PREVERJANJE UČINKOVITOSTI KAVITACIJSKE OBDELAVE MORSKE VODE

Cilj raziskav je bil v hidravličnem laboratoriju UL FGG razviti novo napravo in s poskusi s sladko vodo doseči nastajanje čim boljše hidrodinamske kavitacije, nato pa učinek nove naprave preveriti na treh značilnih organizmih v morski vodi severnega Jadrana. Najprimernejšo zasnovo elementov, ki v cevovodu ustvarjajo razmere za razvoj kavitacije, smo določili s preizkušanjem različnih geometrij šob in z različnimi porazdelitvami po prerezu (slika 3), kombinirano z usmerniki curkov. Tako je bilo zasnovano jedro naprave.

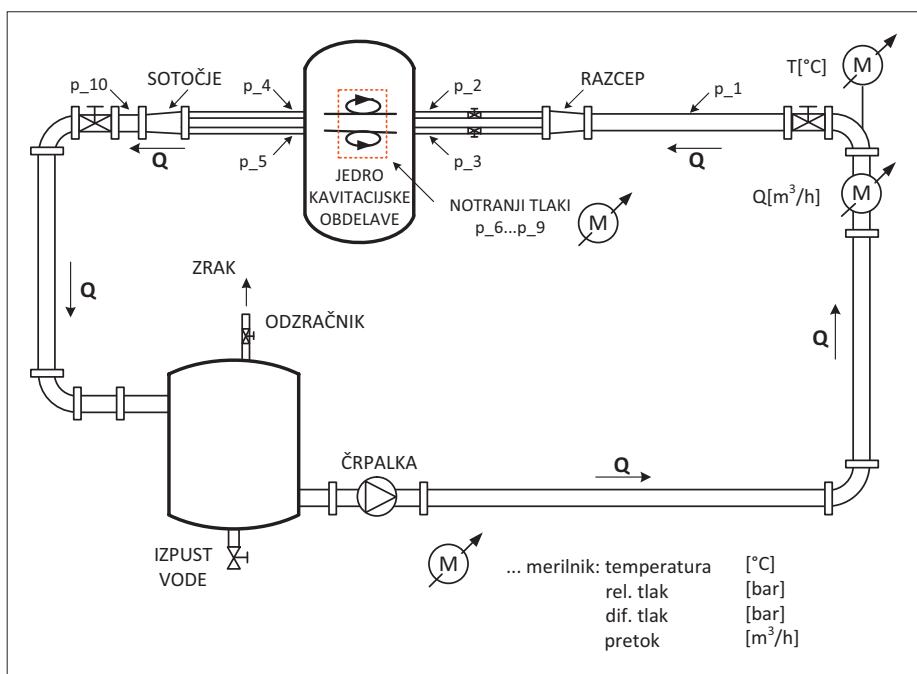
Po razvoju učinkovitega jedra naprave, s katerim se kavitacija kar najboljše ustvarja, smo postopoma zasnovali tri nove konstrukcije pilotnih naprav (oznake: I, II in III), kjer je bilo treba doseči čim večji učinek gradnikov v skupini (šobe, usmerjevalniki ipd.). Preučili smo različne možnosti napeljave cevovodov ter poiskali najprimernejšo konfiguracijo in dimenzije gradnikov v osrednji komori naprave. V vsakem naboru poskusov smo za vse zasnovane naprave merili številne parametre, npr. dejanski pretok (Q_0), zračni tlak (p_0), temperaturo zraka (T_{zraka}) in vode (T_{vode}), tlak na vtoku v sistem (p_1) in dejanski tlak na ključnih točkah, pomembnih za spremljanje delovanja naprave ($p_2...p_{10}$) (slika 4). Z njimi smo izračunali značilne vrednosti delovanja pilotnih naprav, kot so hitrost vode na značilnih prerezih sistema (v), kavitacijsko število (σ), razlike tlakov (Δp) in poraba energije (P), s katerimi je bilo mogoče dokazati primerljivo oz. boljše delovanje novo razvite naprave od doslej znanih naprav.

Prikazana naprava III je pri poskusi izkazala najboljši hidravlični učinek. Kot kaže shema, ima ta v komori vgrajeni dve nasprotno usmerjeni dotočni cevi, ki imata na ustju nameščeni prečni plošči z odprtini. Iztoki iz odprtini za ploščama ustvarjajo območji kavitacije, ki se zaradi nasprotno usmerjenih dotokov medsebojno še intenzivno prepletata.

Ko so se v napravi III opravljali poskusi z morsko vodo, v kateri so prisotni organizmi in druge snovi, je v komori potekalo tudi



Slika 3 • Ena od obravnavanih plošč s petimi odprtinami (srednja odprtina je izvrtana pravokotno, preostale štiri pa pod kotom 45°), za katerimi iztekajoči curki ustvarjajo hidrodinamsko kavitacijo, s ploščo pa so kombinirani še različni usmerjevalniki



Slika 4 • Shema instalacije naprave III z merilno opremo in opremo za uravnavanje pretoka. Zgornji osrednji del je komora, tj. jedro, v katerem se ustvarja kavitacija, ko črpalka poganja izbrani pretok po krogotoku

delno centrifugiranje. Voda namreč v komoro doteka tangencialno, zato so v nastalem vrtničnem toku delci z gostoto, večjo od gostote vode, s centrifugalno silo porinjani k ostenju komore, ob katerem drsijo navzdol, do izpusta na dnu komore. Preostali delci in organizmi v vodi pa potujejo prek območja intenzivne hidrodinamske kavitacije, kjer zaradi znižanega lokalnega

tlaka v komori in višjega notranjega tlaka v organizmih na njih nastanejo poškodbe oz. raztrganje njihovega ovoja (membrane). Ker ni mogoče pričakovati, da bi bili pri enem prehodu območja kavitacije poškodovani vsi organizmi v vodi, smo v drugi fazi poskusov raziskali, koliko prehodov kavitacijske obdelave bi bilo potrebnih, da se doseže zadostni obseg uničenja morskih organizmov.

Raziskave v hidravličnem laboratoriju so bile končane, ko smo z izračunom teoretičnih vrednosti hidravličnega delovanja na pilotni napravi III dokazali večjo učinkovitost, kot jo imajo obstoječe naprave. Sledila je druga (biološka) faza poskusov, tj., da bi z ugotavljanjem poškodovanosti izbranih vrst pri poskusih z morskimi organizmi določili dejanski učinek na morske organizme oz. na ITV.

4 • POSKUSI ZA OVREDNOTENJE BIOLOŠKE UČINKOVITOSTI NAPRAVE

Za naslednjo fazo poskusov smo izbrali le najučinkovitejšo napravo III. Postavili smo jo v Morski biološki postaji Piran, saj je bilo tam mogoče zajeti morskimi vodo in v njej prisotne organizme. Pri teh poskusih smo ugotavljali morfološke spremembe in stopnjo preživetja zooplanktona (kopepodov) in čist *Artemia salina*, z odvzemanjem vzorcev v izbranih časovnih presledkih pa smo določali tudi časovno zmanjševanje preostalega ravnega potenciala morskih bakterij.

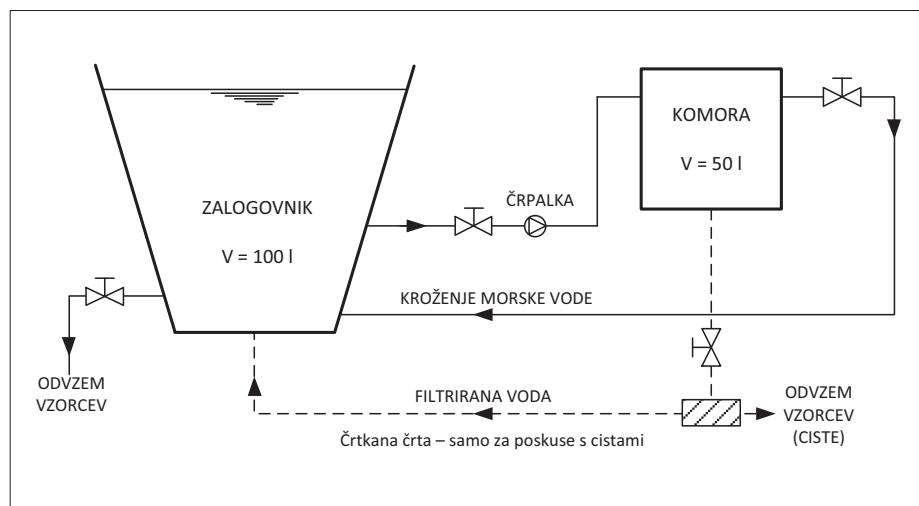
Slika 6 prikazuje zasnovo kroženja vode in spremljajoče instalacije za dovod sveže vode, odvzem za zbiranje čist oz. odvzem vzorcev za ugotavljanje deleža poškodovanih oz. uničenih organizmov. Skupna prostornina morske vode je v enem poskusu v pilotni napravi znašala 150 l (tj. 100 l v zalogovniku in 50 l v komori in v ceveh).

Za kroženje 15 m³/h morske vode skozi napravo je bilo treba doseči tlake na vtoku v komoro le v območju od 1,8 do 2,8 bara. Trajanje enega poskusa je bilo izbrano tako, da je celotna prostornina morske vode stokrat zakrožila skozi napravo in je bilo torej (teoretično) doseženih sto prehodov kavitacijskega območja. Vmes so se izvajali odvzemi vzorcev glede na izbrano število kroženj in s tem števila obdelave s kavitacijo. Poskusi so pokazali, da je dosežena intenzivnost hidrodinamske kavitacije tako učinkovita, da bi lahko bila edini proces za obdelavo balastnih voda. Kljub temu smo raziskali še, za koliko bi se povečal biološki učinek naprave, če bi morskimi vodo predhodno obdelali še s separacijo.

Učinkovitost naprave smo preizkušali na izbrani naravni populaciji planktonskih organizmov (zooplankton in heterotrofne morske bakterije) v morskimi vodi ob Morski biološki postaji Piran. Analizo poškodovanosti zooplanktona in čist smo opravili na vzorcih, ki so bili za vsak opravljen poskus odvzeti iz zalogovnika pred začetkom obdelave (to) ter



Slika 5 • Pilotna naprava III pri poskusih z morskimi vodo, postavljena v Morski biološki postaji Piran

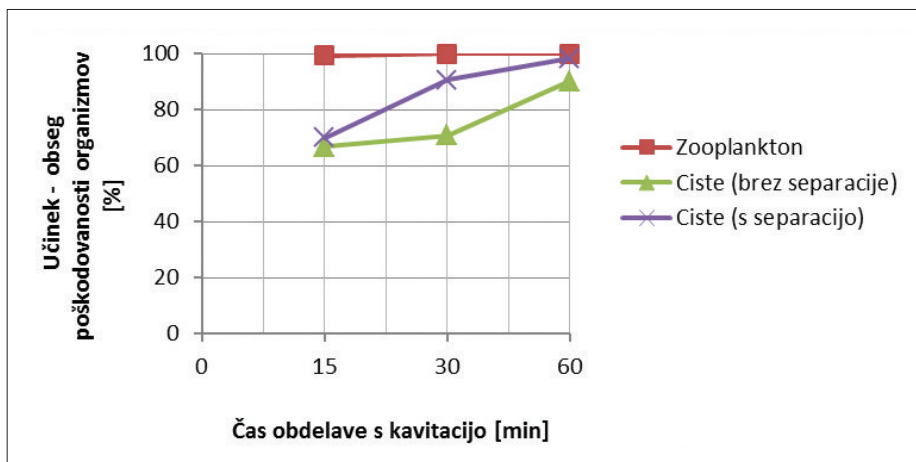


Slika 6 • Shema naprave za obdelavo morske vode in spremljajoče ureditve

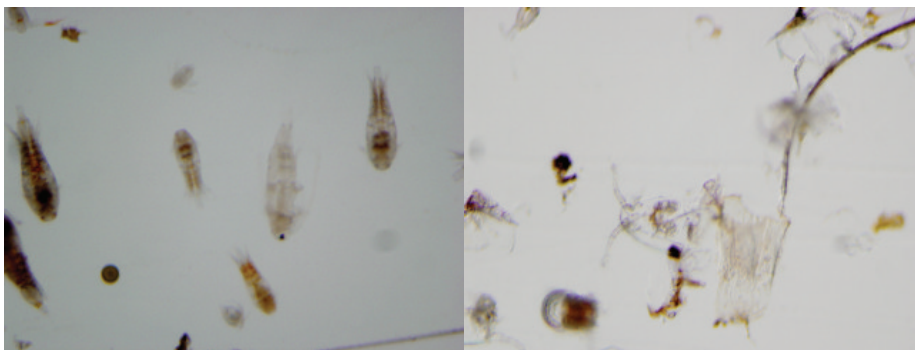
po 15 minutah (t15), po 30 minutah (t30) in po 60 minutah (t60) kavitacijske obdelave. Za bakteriološke analize smo odvzeli vzorce za iste časovne intervale, izpuščen pa je bil odvzem po 15 minutah. Učinkovitost – če se opravi še predobdelava s separacijo (slika 6, črtkana črta) – smo ugotavljali le pri poskusih s cistami, katerih lastna gostota je večja od gostote morske vode (Van Stanpen, 1996). Za preostale testne organizme smo privzeli, da separacija ne bi bila posebej učinkovita – ali ker je lastna gostota organizmov manjša od gostote morske vode ali zaradi njihove plovnosti. Učinkovitost pilotne naprave narašča s časom obdelave, kar bomo prikazali po posameznih organizmih (slika 7).

Za zooplankton je bil kot merilo učinkovitosti upoštevan delež poškodovanega oz. uničenega zooplanktona (kopepodov) po določenem času obdelave. Poskusi so pokazali, da je bilo po zgolj 15 minutah kavitacijske obdelave poškodovanih že do 99,4 % organizmov (slika 8).

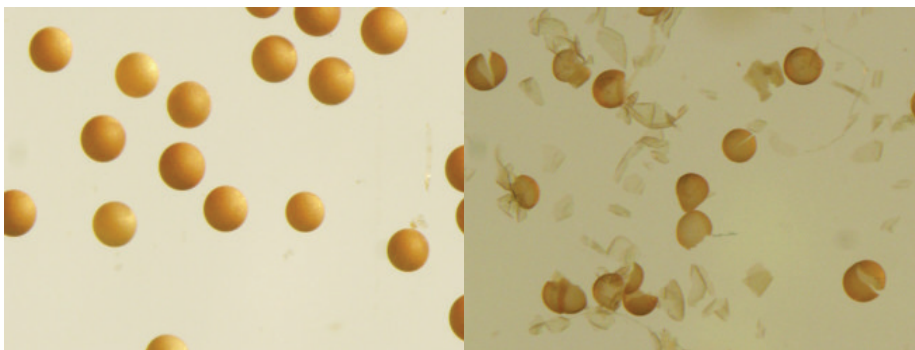
Pri poskusih s cistami je bil po 15 minutah obdelave dosežen obseg do 66,7 % poškodovanih cist, s časom pa se je delež poškodovanosti večal in je po 60 minutah obdelave dosegel 90,2 % poškodovanih cist (slika 9). Ko se je pilotni napravi III dodala še predobdelava vode s separacijo, je bilo po 15 minutah poškodovanih do 69,9 % cist, po 60 minutah obdelave pa kar 98,2 % cist. Ugotovili smo torej, da je naprava III z dodano separacijo še nekoliko učinkovitejša. Po 60 minutah obdelave se je za do 80 % zmanjšalo število morskih bakterijskih celic v preiskanih vzorcih. Zaradi tega preostanka bakterij se je istočasno merila še njihova preostala sposobnost rasti (t. i. BCP). To se je ugotavljalo z dodajanjem 3H-levcina v nosintetizirane proteine v bakterijskih celicah pri odvzetih vzorcih, po postopku, opisanem v literaturi (Kirchman, 1985). Glede na začetno sposobnost rasti nepoškodovanih bakterij smo po 60 minutah obdelave z novo napravo v povprečju izmerili zmanjšanje BCP za 86 %. Rezultati poskusov kažejo, da je le še 1,7 % do največ 30 % preostalih bakterij ohranilo sposobnost rasti, pri čemer je ta razpon v glavnem odvisen od časa trajanja obdelave.



Slika 7 • Učinek obdelave s kavitacijo se je izmeril s stopnjo poškodovanosti organizmov po časovnih intervalih



Slika 8 • Fotografiji vzorca zooplanktona pred obdelavo (levo) in po 60 minutah obdelave s pilotno napravo (desno). Razcefranost organizmov je posledica kavitacijskega procesa



Slika 9 • Fotografija levo kaže ciste *Artemia salina* pred začetkom obdelave (t0), desno pa stanje po 60 minutah obdelave (t60) s pilotno napravo. Poškodbe ovoja so posledica kavitacijske obdelave

5 • RAZPRAVA

Rezultati hidravličnih poskusov, ki so bili potrjeni z biološkimi poskusi o doseženem učinku na testne morske organizme, dokazujejo, da je inovativna zasnova nove naprave

zelo uspešna že zgolj z uporabo enega procesa, tj. hidrodinamske kavitacije morske vode. Izkušnjem s postopno optimizacijo razvityh naprav kažejo, da sta imela pomemben

vpliv na hidravlično učinkovitost tehnologije tako zasnova naprave kot oblikovanje njenih notranjih gradnikov. To pomeni, da bi lahko z nadaljnimi raziskavami še nekoliko izboljšali tehnologijo ne glede na že dosežene visoke učinke, ki jih kažejo dosedanje raziskave. Primerjava naših dosežkov z lastnostmi obstoječih laboratorijskih pilotnih naprav za

obdelavo balastne vode ((Kato, 2003), (IMO, 2006), (Sawant, 2008), (Ranade, 2009)) je bila težavna, saj nekateri ključni podatki obstoječih sistemov niso dosegljivi. Tako v objavah niso podani podrobnejši obratovalni pogoji niti ni mogoča natančna prepoznava njihovih opazovanih organizmov (ker je podan le splošni opis, npr. plankton). Za parametre, ki so dovolj podrobno objavljeni, pa primerjava rezultatov raziskav nedvoumno pokaže pomembne prednosti naše naprave pred drugimi (preglednica 2).

Primerjava s sistemom Sawant pokaže, da je z našo napravo III dosežena približno 17 % večja poškodovanost zooplanktona pri približno enakem trajanju obeh obdelav (po 15 minutah), pri čemer naša naprava omogoča trikrat večje pretoke ob enakih ali celo manjših delovnih tlakih. Primerjava z rezultati sistema Ranade pokaže, da naša naprava za približno 23 % bolj zmanjša številčnost morskih bakterij in obenem enako učinkovito poškoduje zooplankton (več kot 99 % pri obeh sistemih). Najboljši rezultati sistema Ranade kažejo le 46 % zmanjšanje števila bakterijskih celic, za kar je bil potreben tlak 6,9 bara in dosežen pretok 2,95 m³/h. Naša naprava pa je skoraj dvakrat uspešnejša pri zmanjšanju števila bakterijskih celic in boljša pri zmanjšanju sposobnosti ponovne bakterijske rasti, vse to pri

SISTEM	Pretok	Tlak na vhodu v sistem	Učinkovitost pri testiranih organizmih
Sistem Sawant (2008)	4,68 m ³ /h	2,9 bara	82 % poškodovanega zooplanktona
Sistem Ranade (2009)	2,95 m ³ /h	6,9 bara	99 % poškodovanega zooplanktona 46 % zmanjšanja bakterijskih celic
Sistem Kato (2003)	1,13 m ³ /h	10 bar	delna učinkovitost pri poškodovanju cist (odstotek učinkovitosti ni bil podan)
Naša naprava	15 m³/h	1,8 do 2,8 bara	99,4 % poškodovanega zooplanktona do 80 % zmanjšanja bakterijskih celic 98,2 % poškodovanih cist

Preglednica 2 • Primerjava učinkovitosti naše naprave III z obstoječimi eksperimentalnimi napravami, ki tudi uporabljajo hidrodinamsko kavitacijo

bistveno nižjih delovnih tlakih (do 2,8 bara) in z doseženim petkrat višjim pretokom (15 m³/h). Primerjava s sistemom Kato pokaže, da je naša pilotna naprava poškodovala večino cist *Artemia salina* že pri izpostavljenosti trikrat nižjemu vhodnemu tlaku v napravo in ob tem omogočila več kot desetkrat večji pretok. Kato in sodelavci so poročali, da so dosegli le delno poškodovanje cist, žal pa odstotek poškodovanosti ni podan.

Treba je preveriti še, ali nova pilotna naprava že izpolnjuje zahteve standarda D-2 iz konvencije o ravnanju z balastnimi vodami. Prvi cilj je dosežen, saj stopnja poškodovanosti

testiranih organizmov, zlasti kopepodov, že po 30 minutah obdelave doseže to zahtevo iz standarda D-2, vendar pa je treba preveriti še izpolnjevanje drugih zahtev tega standarda. Ena od teh zahtev je, da je treba učinkovitost naprave preveriti pri koncentraciji organizmov v balastnih vodah, ki pa je višja od koncentracije testiranih organizmov v zajeti morski vodi v Piranu. Zato se bo pri nadaljnjih podrobnejših poskusih ugotavljala učinkovitost naprave III še pri višjih koncentracijah različnih mikroorganizmov s posebnim poudarkom na poskusih s fitoplanktonom, zooplanktonom (kopepodi in ciste) ter dodatno s patogenimi bakterijami.

6 • SKLEP

Nova naprava III, v kateri smo koristno uporabili hidrodinamsko kavitacijo, izkazuje ugodne obratovalne pogoje in dokazano visoke učinke na testirane organizme. Njena pomembna prednost je, da zato ni več potrebno dodajanje okolju in ljudem nevarnih kemikalij, saj je visok učinek dosežen zgolj s hidrodinamsko kavitacijo, učinek pa sicer v

manjši meri lahko še izboljšamo z dodano separacijo. Poskusi z morsko vodo dokazujejo visoko učinkovitost naprave na značilne vrste zooplanktona, cist in morskih bakterij, zato je naprava primerna za obdelavo balastnih voda. Hkrati ne vidimo tehničnih ovir, da ne bi bila ta zasnova uporabna še na drugih področjih, kjer je za sterilizacijo

vode potrebno uničenje različnih mikroorganizmov. Pri nadaljnjem razvoju nove naprave bodo opravljene še raziskave pri drugačnih obratovalnih razmerah in poskusi na prototipni velikosti, da bi preverili njeno delovanje še v dejanskih pogojih obratovanja na plovilu, tj. med plovbo, v času natovarjanja oz. praznjenja balastnih voda iz rezervoarjev. Prav tako bo treba s prototipnimi poskusi raziskati še najprimernejši čas za kavitacijsko obdelavo balastnih voda in druge pogoje, ki jih bodo prinesla nova pravila ravnanja z njimi.

7 • LITERATURA

- ABS, American Bureau of Shipping, Ballast Water Treatment Advisory. 2011. <http://www.eagle.org/eagleExternalPortalWEB/ShowProperty/BEA%20Repository/References/ABS%20Advisories/BWTreatmentAdv>, pridobljeno 7. 2. 2016.
- Al-Juboori, R., Aravinthan, V., Yusaf, T., A review of Common and Alternative Methods for Disinfection of Microorganisms in Water, Southern Region Engineering Conference, Toowoomba, Australia, 2010.
- Arrajo, S., Benito, Y., Tarifa, A. M., A theoretical study of hydrodynamic cavitation. *Ultrasonic Sonochemistry* 15, 203–211, 2008.
- Brennen, C. E., *Cavitation and Bubble Dynamics*, New York, Oxford University Press, 1995.

- Brujan, E.-A., *Cavitation in Non-Newtonian Fluids*, Berlin, Springer-Verlag, 2011.
- Chivate, M. M., Pandit, A. B., Effect of sonic and hydrodynamic cavitation on aqueous polymeric solutions, *Ind. Chem. Engr.* 35, 52–57, 1993.
- Cvetković, M., Kompare, B., Krivograd Klemenčič, A., Application of Hydrodynamic Cavitation in Ballast Water Treatment, *Environmental Science and Pollution Research* 22, 7422–7438, 2015.
- David, M., Vessels and Ballast Water, In: David, M., Gollasch, S. (Eds.), *Global Maritime Transport and Ballast Water Management – Issues and Solutions*, Springer Science and Business Media, Vol. 8, 2014.
- David, M., Gollasch, S., Pavliha, M., Global Ballast Water Management and the “Same Location” Concept – A Clear Term or a Clear Issue? *Ecological Application* 23, 331–338, 2013.
- Faimali, M., Garaventa, F., Chelossi, E., Piazza, V., Saracino, O. D., Rubino, F., Mariottini, G.L., Pane, L., A New Photodegradable Molecule as a Low Impact Ballast Water Biocide: Efficacy Screening on Marine Organisms from Different Tropic Levels. *Marine Biology* 149, 7–16, 2006.
- Gogate, P. R., Pandit, A. B., Cavitation Generation and Usage without Ultrasound: Hydrodynamic Cavitation, V: Pankaj, Ashokkumar, M. (ur.), *Theoretical and Experimental Sonochemistry Involving Inorganic Systems*, New York: Springer Science Business Media B.V., 69–107, 2011.
- Gollasch, S., Is Ballast Water a Major Dispersal Mechanism for Marine Organisms? In: Nentwig, W. (Ed.), *Ecological Studies - Biological Invasions*, Springer-Verlag, Berlin, 49–57, 2007.
- IMO, International Maritime Organization, *International Convention for the Control and Management of Ships’ Ballast Water and Sediments*, International Maritime Organization, London, 2004.
- International Maritime Organization (IMO), Status of Conventions., 2016, <http://www.imo.org/en/About/Conventions/StatusOfConventions/Pages/Default.aspx>, pridobljeno 4. 4. 2016.
- Jyoti, K. K., Pandit, A. B., Water disinfection by acoustic and hydrodynamic cavitation, *Biochemical Engineering Journal* 7, 201–212, 2001.
- Kang, J-H., Hyun, B-G., Shin, K., Phytoplankton Viability in Ballast Water from International Commercial Ships Berthed at Ports in Korea, *Marine Pollution Bulletin* 60, 230–237, 2010.
- Kato, H., Cavitation as a Tool of Environmental Protection, 2016, <http://flow.me.es.osaka-u.ac.jp/cav2003>, pridobljeno 7. 2. 2016.
- Khandeparker, L., Chandrashekar, A., Association of Bacteria with Marine Invertebrates: Implications for Ballast Water Management, *EcoHealth* 10, 268–276, 2013.
- Kirchman, D., K’Nees, E., Hodson, R., Leucine Incorporation and Its Potential as a Measure of Protein Synthesis by Bacteria in Natural Aquatic Systems, *Applied Environmental Microbiology* 49, 599–607, 1985.
- Knapp, R., Daily, J., Hammit, F., *Cavitation*, McGraw Book Company, NY, 1970.
- Kuiper, G., *Physics of Cavitation: Gas Content and Nuclei*, 2015. <http://ocw.tudelft.nl/courses/marine-technology/cavitation-on-ship-propellers/3-physics-of-cavitation-gas-content-and-nuclei/>, pridobljeno 27. 6. 2015.
- Lloyd’s Register Group Limited, *Understanding Ballast Water Management Guidance for Ship Owners and Operators*, 2014. http://www.lr.org/Images/Understanding%20Ballast%20Water%20Management_0214_tcm155-248816.pdf, pridobljeno 29. 9. 2014.
- Pandit, A. B., Joshi, J. B., Hydrolysis of fatty oils: effect of cavitation, *Chem. Eng. Sci.*, 48, 3440, 1993.
- Ranade, V.V., Bhalchandra, A., Anil, A.C., Sawant, S.S., Ilangoan, D., Madhan, R., Venkat, K.P., Apparatus for Filtration and Disinfection of Sea Water/Ship’s Ballast Water and a Method of Same. Patent: 7, 585, 416 B2, USA, 2009.
- Ruiz, G. M., Rawlings, T. K., Dobbs, F. C., Drake, L. A., Mullady, T., Huq, A., Colwell, R. R., Global Spread of Microorganisms by Ships – Ballast Water Discharged from Vessels Harbours: A Cocktail of Potential Pathogens, *Nature* 408, 49, 2000.
- Sawant, S. S., Anil, A. C., Krishnamurthy, V., Gaonkar, C., Kolwalkar, J., Khandeparker, L., Desai, D., Mahulkar, A. V., Ranade, V. V., Pandit, A. B., Effect of Hydrodynamic Cavitation on Zooplankton: A Tool for Disinfection, *Biochemical Engineering Journal* 42, 320–328, 2008.
- Seiden, J. M., Rivkin, R. B., Biological Controls on Bacterial Populations in Ballast Water during Ocean Transit, *Marine Pollution Bulletin* 78, 7–14, 2014.
- Van Stanpen, G., Artemia, In: Lavens, P., Sorgeloos, P. (Eds.), *Manual on the Production and Use of Live Food for Aquaculture*, Laboratory of Aquaculture and Artemia Reference Center University of Ghent, Belgium, Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO), Roma, 79–250, 1996.
- Zenetos, A., Gofas, S., Morri, A., Rosso, D., Violanti, J. E., Garcia Raso, M. E., Çinar, A., Almongi-Labin, A. S., Ates, E., Azzurro, E., Ballestros, C. N., Bianchi, M., Bilecenglu, M. C., Gambi, A., Giangrande, C., Gravili, O., Hymys-Kaphzan, P. K., Karachle, S., Katsanevekis, L., Lipej, F., Mastrototaro, F., Mineur, M. A., Pancucci-Papadopoulou, A., Ramos Espla, C., Salas, G., San Martin, A., Sfriso, N., Streffaris, N., Verlaque, M. Alien Species in the Mediterranean Sea by 2012., A Contribution to the Application of the European Union’s Marine Strategy Framework Directive (MSFD), Part 2, Introduction Trends and Pathways, *Mediterranean Marine Science* 13/2, 328–352, 2012.