

ПОДВОДНИЯ ШУМ СЪЗДАВАН ОТ ВИСОКОСКОРОСТНИ КОРАБИ С ВОДОМЕТНИ ДВИЖИТЕЛИ

инж. Григорина Пепо Цачева - Докторант, Технически университет – гр.Варна,
инж. Йоана Симеонова Ковачева - Докторант, Технически университет – гр.Варна,
доц. Анета Димитрова Върбанова - Технически университет – гр.Варна.

Резюме: *Тази статия има за цел да представи проблемите, свързани с подводния шум в океаните и моретата, създаван от високоскоростни кораби с водометни двигатели и да покаже тяхното предимство пред винтовите двигатели.*

Ключови думи: *Водометни двигатели, подводен шум, кавитация, високоскоростни кораби, винтови двигатели.*

THE UNDERWATER NOISE CREATED BY HIGH-SPEED CRAFTS WITH WATERJETS

Grigorina Pepo Tsacheva - PhD Student, Technical University-Varna,
Yoana Simeonova Kovacheva - PhD Student, Technical University-Varna,
Assoc. Prof. PhD Aneta Dimitrova Varbanova - Technical University-Varna.

Abstract: *This article aims to present the problems associated with underwater noise in the oceans and seas created by high-speed ships with waterjet propulsion and to show their advantage over propeller propulsion.*

Keywords: *Waterjets, underwater noise, cavitation, high speed crafts, propeller propulsion.*

1. Въведение

Последните десетилетия голям брой анализатори насочиха своето внимание в проучване, събиране на данни и доказателства, които показаха отрицателното влияние на антропогенния шум от корабоплаването и морския трафик върху живота на морските обитатели. Търговското корабоплаване е един от основните фактори, допринасящи за подводния шум, който оказва неблагоприятно въздействие върху критичните жизнени функции за широк спектър от морски живот.

Високоскоростните плавателни съдове (High speed craft - HSC), като фериботи, патрулни лодки и други бързи кораби имат голям дял за подводното шумово замърсяване, поради тяхната скорост, системи за задвижване и дизайн. Въздействието върху околната среда на шума, произвеждан от високоскоростни плавателни съдове, особено върху морските екосистеми, се проучва все повече поради честата им експлоатация в крайбрежни и чувствителни морски зони. Шумът, излъчван от морските кораби е проблем с нарастващо темпо, за който има достатъчно доказателства, сочещи пагубното му въздействие върху морския живот.

Важно е да се признае, че както за нови, така и за съществуващи кораби, техническата приложимост и рентабилността на мерките за намаляване на подводния шум, разглеждани поотделно или в комбинация, ще бъдат силно зависими от дизайна, експлоатационните параметри и изискванията, свързани с конкретен кораб.

2. Цел

Основните цели на тази статия са:

- Идентифициране и описване на основните източници на подводен шум, свързани с високоскоростни кораби с водометни двигатели.
- Предлагане на възможни решения и стратегии за намаляване на шумовото замърсяване от високоскоростни кораби, като например технологични подобрения, регулаторни мерки и промени в корабоплаването.
- Повишаване на осведомеността относно проблема и насърчаване на сътрудничество между различни заинтересовани страни за опазване на морската среда.

3. Основна част

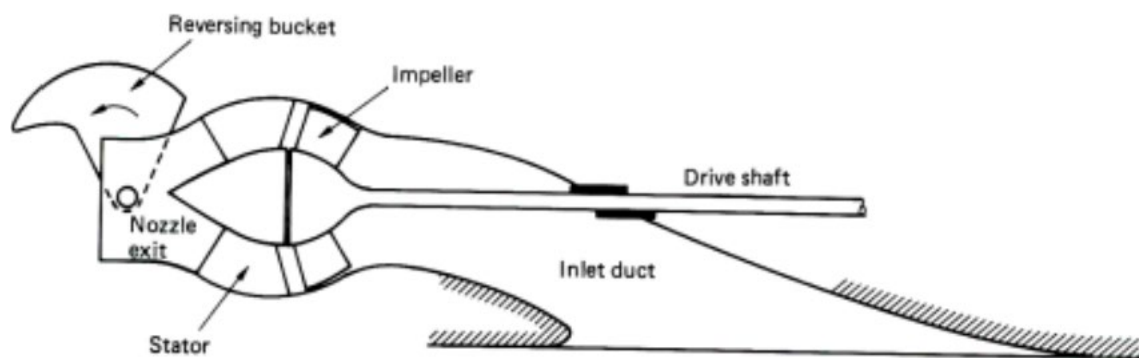
Високоскоростните плавателни съдове са специализирана категория морски плавателни съдове, предназначени да работят при значително по-високи скорости от конвенционалните плавателни съдове, като често използват лека конструкция и усъвършенствани системи за задвижване [1].

От оперативна гледна точка, скоростта обикновено се счита за доминиращ фактор за нивата на излъчвания шум. Някои крайбрежни водни пътища като речните естуари и пристанищата имат въведени ограничения на скоростта от съображения за безопасност и намаляване на ерозията. Има сериозни доказателства, че намаляването на скоростта може да доведе и до намаляване на нивата на шум за търговските кораби, особено, ако намалената скорост елиминира кавитацията. Много от опитите показват, че съществува корелативна връзка между скоростта и нивата на излъчван шум за кораби.

Редица проучвания обаче показват, че някои кораби могат да произвеждат повече шум и при по-ниски скорости. Това може да се случи по различни причини. Например в едно проучване беше установено, че една от лодките тествано произвежда повече шум при 9 възела отколкото при 18 възела [2]. Под вода камерите разкриват, че това се дължи на по-лошата кавитация при скорост 9 възела е било отбелязано, че витлото е проектирано за скорости над 20 възела. За плавателни съдове, оборудвани с витла с контролируема стъпка, намалявайки скоростта чрез намаляване на стъпката, а не чрез вал за намаляването на скоростта също може да доведе до повишени нива на шум. Намаляването на стъпката на витлото при постоянна скорост на вала може да доведе до значителни нива на кавитация от страната на налягането, както и други видове кавитация, дължаща се на витлото, работещо в непроектно състояние. По този начин ефективността на ограниченията на скоростта ще зависи от вида на плавателния съд и неговата задвижваща система. Затова са необходими допълнителни изследвания, които да предоставят по-пълна картина за връзката между скоростта и шума на по-широк набор от съдове.

Водометните двигатели са системи за задвижване, използвани в някои плавателни съдове, особено високоскоростни фериботи, лодки за отдих и военни кораби. Те работят, като засмукват вода в помпа и след това я изхвърлят с висока скорост през дюза, за да създадат тяга. Въпреки че водометните двигатели са известни със своята ефективност и маневреност, те също допринасят за замърсяването с подводен шум, което може да засегне морските обитатели. В тази статия ще разгледам какви са източниците на шум, на какви фактори се дължи този шум, начините за справяне с подводния шум, създаван от високоскоростни кораби с водометни двигатели и сравнителна характеристика, по отношение на създавания шум, между водометни двигатели и традиционни витла.

Принципът на работа на водометните двигатели се различава от традиционно познатите ни кораби с винт. Системата започва със засмукване на вода отдолу на съда [3]. Тази вода попада в системата през вход кингстон, който се намира от долната страна на корпуса. Всмукателният отвор има решетки, за да се предотврати навлизането на големи отпадъци в системата и повредата на компонентите. Във водоструйната система, водата се ускорява от въртящ се компонент, наречен работно колело (impeller – фиг.1). Работното колело е подобно на турбина или помпа и има лопатки, които се въртят, за да изтласкат водата напред. Скоростта и налягането на водата се увеличават, докато се движи през работното колело. Ролята на работното колело е да създава високоскоростен воден поток чрез преобразуване на механичната енергия (от двигателя) в кинетична енергия. Колкото по-бързо се върти работното колело, толкова по-бързо водата се изхвърля от дюзата (nozzle – фиг.1) . След преминаване през работното колело, водата преминава през стесняващ се дифузер или статорна секция, която допълнително насочва и увеличава скоростта на водата. Тази фаза гарантира, че водата поддържа висока скорост и плавен поток, докато се насочва към дюзата. Ускоряването на водата в системата е от ключово значение за генерирането на тяга: колкото по-висока е скоростта на водата, която се изхвърля, толкова по-голяма е силата, която тласка кораба напред. Водата се изхвърля през дюза в задната част на система. Дюзата обикновено е регулируема, което позволява да се контролира посоката на водната струя. Тази изхвърлена водна струя създава тяга, която тласка съда напред.



Фиг. 1 Принцип на работа на водометен двигател [4]

Физиката зад този процес се основава на Третия закон на Нютон: Всяко действие има равно по големина и противоположно по посока противодействие [5] Тъй като водата се изхвърля с висока скорост от задната част на дюзата, корабът се движи напред в обратна посока.

Какви са източниците на подводен шум на високоскоростни кораби с водометни двигатели?

- Двигателя:

Много високоскоростни плавателни съдове използват водометни двигатели за задвижване. Те могат да предизвикат по-малко кавитация от конвенционалните витла, но въпреки това генерират значителен шум, особено при високи скорости. Шумът от водометните двигатели включва, както механичен шум от двигателя, така и хидродинамичен шум от всмукване и изтласкване на вода през дюзи.

- Шум от корпуса:

Високоскоростните плавателни съдове имат различен дизайн на корпуса, който може да повлияе на производството на шум. Взаимодействието между корпуса и водата, особено при високи скорости, може да създаде турбуленция и хидродинамичен шум. При корпусите, които се издигат от водата с висока скорост, газенето на кораба намалява и това създава по-малко съпротивление, но може да генерира турбуленция и шум във водата.

- Шум от двигателя и машините:

Мощните двигатели, необходими за задвижване на високоскоростни кораби, могат да бъдат значителни източници на подводен шум. Дизеловите или газотурбинните двигатели, заедно със спомагателните машини, предават вибрации през корпуса във водата.

Подводният шум от кораби с водометно задвижване може да се дължи на няколко фактора:

- Шум от помпата и работно колело:

Механизмът на помпата, включително работното колело (което се върти, за да задвижва водата през системата), може да генерира шум. Въртящите се лопатки на работното колело причиняват колебания на налягането и вибрации, създавайки звукови вълни, които се разпространяват под водата[6].

- Засмукване и изхвърляне на вода:

Водометните двигатели засмукват големи обеми вода и след това я изхвърлят с висока скорост. Турбулентният поток и промените в налягането, свързани, както с всмукването, така и с изпускането, могат да създадат значителен шум. Шумът от изхвърлянето на вода обикновено е с ниска честота, което е проблематично, тъй като нискочестотните звуци могат да се разпространяват на големи разстояния под водата, засягайки морските екосистеми далеч от източника.

Какво представлява кавитацията? Международната морска организация дава дефиниция в МЕРС.1/Circ.906 от 22ри Август 2023 Насоки за намаляване на подводния шум от корабоплавателна дейност. Кавитация - намаляването на налягането на околната среда чрез статични или динамични средства, което може да бъде причинено от перката или други устройства, причинявайки образуването на мехурчета в течността. Образуването се отнася както до създаването на нова кухина, така и до разширяването на вече съществуваща. Когато тези мехурчета пътуват до места с по-високо околно налягане, те се свиват, генерирайки основния източник на шум от задвижваните кораби[7].

Кавитацията е често срещан проблем при високоскоростните водометни двигатели. Когато възникне кавитация, тя генерира силен широколентов шум, който е един от основните фактори, допринасящи за подводния звук от водометни двигатели. Кавитацията на водометните двигатели е явление, което възниква, когато налягането на водата падне под налягането на парите, което води до образуването на мехурчета от пара в течността. Тези мехурчета обикновено се образуват в области с ниско налягане, като например около лопатките на работното колело или дюзите за водна струя. Когато налягането се повиши отново, мехурчетата на парата се свиват, причинявайки редица проблеми, включително шум, вибрации и дори физическо увреждане на компонентите. Кавитацията е особено често срещана при високоскоростни двигатели с водометни двигатели поради бързото движение на водата през помпата и дюзата.

Причини за кавитация при водометни двигатели:

- Зони с ниско налягане - в системата с водна струя водата се ускорява през всмукателен отвор, преминава през работно колело (което осигурява задвижващата сила) и след това се изхвърля през дюза. Когато водата тече през тази система, могат да се образуват зони с ниско налягане, особено около лопатките на работното колело или при дюзата. Ако налягането падне под налягането на водните пари, възниква кавитация [8].

- Високи скорости на потока - водоструйните системи работят при високи скорости, като често създават значителни разлики в налягането в системата. Бързото движение на водата и резките промени в налягането могат да доведат до локализиранни области с ниско налягане, където се образуват кавитационни мехурчета.

- Фактори на дизайна - геометрията на входа за вода, лопатките на работното колело и дюзата могат значително да повлияят на вероятността от кавитация. Например лошо проектирани лопатки на работното колело, които генерират прекомерна турбуленция или резки завои във водния поток, могат да увеличат кавитация.

Кавитацията е по-вероятно да възникне при високи работни скорости или при тежки условия на натоварване, когато водоструйната система работи близо до максималния си капацитет.

Налягането на парите на водата се увеличава с температурата. В по-топлата вода е по-вероятно да се появи кавитация, тъй като налягането на парите е по-високо, което улеснява образуването на мехурчета в точки с по-ниско налягане.

Има няколко вида кавитация, всяка с различни характеристики и причини, но при водометните движители най – често срещани са следните два типа кавитация [9]:

- Кавитация „Sheet” - когато върху повърхността на лопатките на работното колело се образува непрекъснат слой пара. Парните мехурчета растат по повърхността на острието, преди да се преместят надолу по течението. Този вид кавитация може да причини значителни щети с течение на времето.

- Вихрова кавитация - този тип кавитация възниква във върховете на лопатките на работното колело, където скоростта на потока е най-висока. Завихряне се образува, когато водата се движи бързо над върховете на лопатките, което води до кавитационни мехурчета в тези високоскоростни места. Вихровата кавитация на върха може да генерира значителен шум и вибрации.

Един от неблагоприятните ефекти от кавитацията е генерирането на шум. Когато парните мехурчета се движат, те създават малки ударни вълни, които могат да произведат значителен широколентов шум. Този шум може да се разпространява във водата и да допринесе за подводно шумово замърсяване, засягайки морската екосистема. Отчетливият звук, генериран от кавитация (високочестотен широколентов шум), може да бъде открит с помощта на подводни микрофони или хидрофони. Чрез анализиране на шума операторите могат да определят дали има кавитация и колко тежка е тя?

Мерки за намаляване на подводния шум от високоскоростни плавателни съдове.

За справяне с въздействието върху околната среда на подводния шум от високоскоростни плавателни съдове могат да се използват няколко смекчаващи мерки и стратегии за управление:

- Намаляване на скоростта: Забавянето на плавателни съдове в чувствителни морски зони е един от най-ефективните начини за намаляване на подводния шум. Намаляването на скоростта на високоскоростните плавателни съдове намалява интензивността на кавитацията и турбулентността, което води до по-ниски нива на шум.

- Тих дизайн на кораба Quite class: Разработването на по-тихи системи за задвижване, включително оптимизиран дизайн на корпуса, по-тихи водни струи и витла за намаляване на шума, може да помогне за намаляване на общия шум. Инженерите могат да се съсредоточат върху намаляване на кавитацията, турбуленцията и механичния шум, за да минимизират въздействието върху околната среда на високоскоростните плавателни съдове.

- Морски защитени зони: Създаването на морски защитени зони, където скоростта на корабите е ограничена или някои видове високоскоростни плавателни съдове да са забранени, може да помогне за защитата на критичните местообитания и да намали въздействието на шума върху морската фауната и флора.

- Мониторинг и предупреждения в реално време: Прилагането на акустичен мониторинг в реално време на подводния шум може да помогне за идентифициране на зони, където нивата на шум са високи, и да подтикне операторите на плавателни съдове да предприемат действия, като забавяне или промяна на маршрута си.

- Международни разпоредби и насоки: Международни организации, като Международната морска организация (ММО), са признали проблема с подводния шум и работят за насоки и разпоредби с цел намаляване на шумовото замърсяване от кораби, включително високоскоростни плавателни съдове. През 2014г. ММО издава указания за намаляване на подводния шум от кораби. Тези указания към момента са доброволни, но ММО отчита разрастването на проблема с подводния шум и в следващите години от препоръчителни ще станат задължителни. Разпоредбите на ММО са насочени към кавитацията на двигателите като главен източник на шумово замърсяване.

Предимства на корабите с водометните двигатели, пред такива с винтови двигатели.

Високоскоростните кораби с водометни двигатели имат редица предимства пред винтовите двигатели. Тази статия е концентрирана върху предимствата по отношение на въздействието на този вид двигатели върху околната среда, и по специално подводния шум.

- Кавитацията: Когато се появи кавитация при водометни двигатели, тя има тенденция да бъде по-малко интензивна и локализирана, произвеждайки по-малко нискочестотен шум в сравнение с витлата. Водометните двигатели са склонни да произвеждат по-малко кавитационен шум при високи скорости, отколкото витлата, което е една от причините да бъдат предпочитани за високоскоростни плавателни съдове като бързи фериботи и военноморски кораби. Витлата обикновено са по-шумни, особено в

нискочестотния диапазон, и имат по-голямо въздействие върху околната среда [9]. Въпреки че водометните двигатели са по-тихи при по-ниски скорости и произвеждат по-малко нискочестотен шум, все пак могат да генерират значителен шум при средни до високи честоти при по-високи скорости, но общото им въздействие върху околната среда обикновено е по-малко от това на витлата, особено по отношение на разпространението на нискочестотен шум.

- **Вибрационен шум:** Водометните двигатели произвеждат по-малко вибрационен шум, тъй като работата им е по-плавна. Те генерират тяга чрез изтласкване на вода през дюза, а системата е добре интегрирана в корпуса, което води до намалени вибрации. Това ги прави изгодни за минимизиране на предаването на шум от конструкцията на плавателния съд във водата. Работата на витлата, особено при по-високи скорости, може да причини значителни вибрации в корпуса на кораба, които могат да се предадат във водата и да увеличат общия шумов отпечатък на плавателния съд [9].

- **Мощност:** Водометните двигатели осигуряват по-плавно подаване на мощност в сравнение с витлата. Тъй като системата за задвижване включва непрекъснат воден поток през системата, а не механично въртене на перките, тя произвежда по-малко колебания на шума, особено в чувствителни честотни диапазони. Периодичната тяга, доставяна от въртящи се лопатки на витлата, причинява променливи модели на шум, които могат да бъдат разрушителни за морските видове, особено тези, които разчитат на звук за комуникация и навигация.

- **Морския живот:** Поради по-ниската кавитация и по-малкото механично смущение във водата, водометните двигатели обикновено, се считат за по-малко вредни за морските обитатели в сравнение с плавателните съдове с винт. Морските бозайници, като делфините и китовете са особено чувствителни към нискочестотния шум, произвеждан от витлата. По-тихата работа на водните струи може да помогне за намаляване на смущенията за тези видове. Високите нива на шум, генерирани от витлата, особено от кавитация, могат да причинят значителни смущения в морската екосистема, което води до промени в поведението или миграция на чувствителните видове (делфини, риби и други морски животни) в други местообитания.

- **По-добра пригодност за плитки води:** Водометните двигатели също са от полза за плавателни съдове, работещи в плитки води или близо до крайбрежни зони, където шумът от витлото може да наруши местообитанията. Те не разчитат на големи, открити остриета, така че могат да работят в зони с по-малка дълбочина без да генерират

толкова много шум или физически смущения. В плитки води витлата могат да създадат повече шум и смущения от утайки, въздействайки върху екосистеми като ливади с морска трева и коралови рифове, които разчитат на относително необезпокоявана среда.

4. Заключение

Подводният шум, произвеждан от високоскоростни плавателни съдове, поставя значителни екологични предизвикателства за морските екосистеми. Той може да наруши комуникацията, да промени поведението и да причини физиологичен стрес при морските животни, особено морските бозайници, рибите и безгръбначните. Дългосрочното излагане на шумово замърсяване може да допринесе за изместване на местообитанията, репродуктивна недостатъчност и намалено биоразнообразие. Прилагането на смекчаващи мерки, като намаляване на скоростта, по-тихи конструкции на кораби и приемане на защитни нормативни разпоредби, са от решаващо значение за минимизиране на въздействието върху околната среда на подводния шум и запазване на морското биоразнообразие. Напредъкът в дизайна и оперативните стратегии може да помогне за смекчаване на тези въздействия, но разбирането и справянето с подводното шумово замърсяване остава важно предизвикателство за защитата на морските екосистеми. Предимствата в използването на водометните двигатели за високоскоростните плавателни кораби са намаляват подводният шум, по-щадящи са за околната среда и крайбрежните райони, съответно по-подходящи за чувствителната морска среда, където шумовото замърсяване се оказва голям проблем за морските обитатели. Стабилните регулаторни рамки и съвместните усилия между морската индустрия и изследователите са от решаващо значение за устойчивата работа на високоскоростните плавателни кораби.

5. Използвана литература

- [1] L. A. Díaz-Secades, R. Bouzón Otero, Y. Amado-Sánchez, and F. C. Moreno, “Noise Exposure and Mitigation on High-Speed Craft: Assessing Acoustic Environment and Regulatory Compliance,” *J. Mar. Sci. Eng.*, vol. 12, no. 12, 2024, doi: 10.3390/jmse12122329.
- [2] M. Svedendahl, E. Lalander, P. Sigraý, M. Östberg, and M. H. Andersson, “Underwater acoustic signatures from recreational boats Field measurement and guideline,” no. September, 2021.
- [3] ABS, “Practical Considerations For Underwater Noise Control,” *Am. Bur. Shipp.*, no.

- February, p. 10, 2021, [Online]. Available:
<https://ww2.eagle.org/content/dam/eagle/publications/whitepapers/underwater-noise-control-whitepaper-21011.pdf>.
- [4] P. Ghadimi, R. Shademani, and M. Y. Fard, “Performance assessment of the waterjet propulsion system through a combined analytical and numerical approach,” *Int. J. Phys.*, vol. 1, no. 2, pp. 22–27, 2013, doi: 10.12691/ijp-1-2-1.
- [5] “Трети закон на Нютон.” <https://fizikazakoni.wordpress.com/3-закон-на-нютон/#:~:text=Третиат закон на Нютон гласи,и противоположно по посока противодействие.>
- [6] Y. Dai, Z. Liu, W. Zhang, J. Chen, and J. Liu, “CFD-FEM Analysis of Flow-Induced Vibrations in Waterjet Propulsion Unit,” *J. Mar. Sci. Eng.*, vol. 10, no. 8, 2022, doi: 10.3390/jmse10081032.
- [7] IMO, “Revised Guidelines for the Reduction of URN from Shipping to Address Adverse Impacts on Marine Life,” *Int. Marit. Organ.*, vol. MEPC.1/Cir, no. October, pp. 1–19, 2023, [Online]. Available:
<https://wwwcdn.imo.org/localresources/en/OurWork/PartnershipsProjects/Documents/GloNoise-Library/MEPC.1-Circ.906 - Revised Guidelines For The Reduction Of Underwater Radiated Noise From Shipping to address Adverse Impacts on Marine Life %252822 August 202.>
- [8] Z. Wang, Y. Cai, and C. Yang, “Design and Verification of a Noise Test Device for Water-jet Propulsion Pumps,” *Proc. Fifth Int. Symp. Mar. Propulsors*, vol. 1, no. June, pp. 2–7, 2017.
- [9] E. Cruz, T. Lloyd, J. Bosschers, F. H. Lafeber, P. Vinagre, and G. Vaz, “Study on inventory of existing policy, research and impacts of continuous underwater noise in Europe,” *EMSA Rep. EMSA/NEG/21/2020*, 2021, [Online]. Available:
<http://www.emsa.europa.eu/publications/reports/item/4569-sounds.html>.