

Залож В.І., Тирон-Воробйова Н.Б., Данилян А.Г.

ІННОВАЦІЙНІ ПІДХОДИ ДО АВТОМАТИЗАЦІЇ ПРОЦЕСІВ ЗНЕЗАРАЖЕННЯ І ОЧИЩЕННЯ ВОДНОГО БАЛАСТУ СУДЕН

Анотація. В роботі представлено інноваційну технологію знезараження та очищення водного баласту суден відповідно до вимог Правила D-2 Міжнародної морської організації. В межах виконання державного наукового проекту №0124U004399, що фінансується Міністерством освіти і науки України, науковим колективом Дунайського інституту Національного університету "Одеська морська академія" розроблено та апробовано інноваційну технологію обробки суднових баластних вод. У галузі сучасного мореплавства баластна вода виступає ключовим фактором підтримки стабільності та безпеки експлуатації суден. Проте наявність у ній численних морських організмів спричиняє серйозні виклики, що мають багатомірний характер – від загроз екологічній рівновазі до економічних збитків та ризиків санітарно-епідеміологічного характеру. Переміщення баластних вод між різними географічними локаціями зумовлює інвазію нехарактерних мікроорганізмів у нові екосистеми. Це явище несе потенційну загрозу деструкції локальної біоти та може спровокувати суттєві економічні втрати для приморських регіонів. Створена експериментальна установка реалізує комплексний підхід до очищення баластних вод шляхом послідовного застосування хімічних, іонізаційних та механічних методів обробки. Ключовим завданням також є створення автоматизованої системи керування експериментальним устаткуванням для обробки баластних вод морського походження. Система має забезпечувати прецизійний моніторинг технологічних параметрів та оптимізувати проведення лабораторних випробувань, підвищуючи їх результативність. Розроблена багатофункціональна система управління водним баластом призначена для великотоннажних морських суден та повністю відповідає вимогам Правила D-2. Експериментальні дослідження підтвердили високу ефективність запропонованої технології у знищенні патогенних мікроорганізмів та очищенні баластних вод, що документально підтверджено результатами лабораторних випробувань. Наразі система проходить процедуру типового схвалення та сертифікації відповідно до міжнародних стандартів.

Ключові слова: баластна вода, морські судна, знезараження, очистка, інвазійні види, система керування.

Постановка проблеми. Сучасне судноплавство неможливе без використання баластної води, яка забезпечує остійність та експлуатаційну безпеку морських суден. Втім, ця вода містить численні морські організми, що створює низку викликів екологічного, економічного та санітарно-епідеміологічного характеру. У баластній воді присутні різноманітні мікроорганізми, включаючи патогенні бактерії, а також яйця, цисти та личинкові форми морських організмів [1]. При потраплянні у нове середовище ці види здатні пристосовуватися, формувати стійкі популяції та набувати інвазивного характеру, витісняючи місцеві види та порушуючи природний баланс екосистем. Транспортування води з одного географічного регіону в інший призводить до міграції чужорідних мікроорганізмів, що може спричинити деградацію місцевої біоти та негативно вплинути на економіку прибережних територій.

Систематичні спостереження за станом морських екосистем виявили тривожну тенденцію до їх деградації, що вимагає невідкладного впровадження інноваційних технологій очищення морського середовища, зокрема ефективних систем обробки суднових баластних вод.

Мета роботи – представити технологію знезараження і очищення водного баласту суден та розробити автоматизовану систему управління експериментальної установки знезараження і очищення морської баластної води для забезпечення точного контролю технологічних параметрів процесу й підвищення ефективності лабораторних досліджень.

Актуальність. З метою мінімізації загроз, пов'язаних з поширенням інвазивних видів через баластні води, світова спільнота ухвалила «Міжнародну конвенцію про контроль суднових баластних вод й осадів та управління ними» [3]. Документ, прийнятий у 2004 році, набув чинності 8 вересня 2017 року. Гранично допустимі концентрації життєздатних організмів у баластній воді регламентуються Правилom D-2 «Стандарт технічних характеристик баластних вод» [4], затвердженим Міжнародною морською організацією (ІМО) [2].

Екологічний моніторинг Чорного моря, проведений міжнародною науковою спільнотою у 2019 році, виявив критичне погіршення стану морської екосистеми. Протягом п'ятирічного періоду спостережень зафіксовано трикратне збільшення рівня забруднення морського середовища.

Порівняльний аналіз забрудненості Чорного та Середземного морів демонструє тривожну тенденцію. За комплексним показником, що враховує концентрацію пластикових відходів, хімічних домішок та важких металів, співвідношення рівнів забруднення становить 95:52 на користь Чорного моря. Це особливо показово, враховуючи, що історично саме Середземне море вважалося найбільш забрудненим водним басейном регіону.

Деградація морського середовища призвела до катастрофічних наслідків для біорізноманіття:

- повне зникнення окремих видів риб (чорноморська сардинела, чорноморська скумбрія);
- тридцятикратне скорочення популяції осетрових порівняно з 1980 роком;
- десятикратне зменшення чисельності представників родини кефалевих.

Істотної шкоди зазнали природні поселення чорноморських мідій через проникнення з корабельним баластом хижого моллюска *Rapana venosa*. Дослідним шляхом підтверджено, що одна мідія середнього розміру щодоби фільтрує близько 40 літрів морської води, видаляючи з неї сполуки важких металів та інші хімічні елементи, що становлять небезпеку для морської фауни та людини. Значну загрозу для прибережних екосистем становить поява патогенних вірусів, поширення яких може спровокувати масштабні епідеміологічні наслідки для населення прибережних країн.

Такі драматичні зміни екосистеми підкреслюють критичну необхідність розробки та впровадження ефективних технологій очищення морського середовища, включаючи системи обробки баластних вод. Отож, актуальним залишається завдання розробки інноваційної технології знезараження і очищення водного баласту суден згідно Правилa D-2 вимог ІМО.

Аналіз існуючих досліджень і публікацій. Проблема забруднення морських екосистем через інвазію чужорідних видів організмів, що переносяться баластними водами суден, є предметом активних наукових досліджень протягом останніх десятиліть. Значна частина цих робіт присвячена детальному вивченню видового складу та життєвих циклів мікроорганізмів, яєць, цист і личинок, які можуть бути присутніми в баластних водах.

Так, у публікаціях *Lakshmi* [5] та *David i Gollasch* [7] наводиться ґрунтовний опис різноманітних організмів, включаючи патогенні бактерії, а також яйцеклітини, цисти та личинки безхребетних, що виявляються в баластних водах. Автори підкреслюють здатність цих чужорідних видів пристосовуватись до нових умов і формувати стійкі інвазивні популяції в місцевих екосистемах.

Особливу увагу науковці приділяють вивченню негативного впливу інвазивних видів на біорізноманіття морських екосистем. Зокрема, в оглядових статтях *Bailey et al.* [6] та *Outinen et al.* [13] наводяться дані щодо катастрофічного скорочення популяцій ряду видів риб, моллюсків та інших гідробіонтів морів внаслідок поширення чужорідних організмів. Аналогічні загрози для екосистем висвітлюються в публікаціях *Zatoń-Sieczka i Czerniejewski* [15] та *Amidi i Fatemi* [14].

Поряд з екологічними збитками, дослідники також аналізують економічні наслідки деградації морських екосистем через інтродукцію інвазивних видів. *Lakshmi* [5] та *Bailey* [6]

підкреслюють необхідність впровадження ефективних заходів контролю та очищення баластних вод для мінімізації цих негативних впливів.

Значна частина наукових праць присвячена оцінці різноманітних технологій обробки баластних вод відповідно до вимог Міжнародної конвенції. У роботах David і Gollasch [7], Liu [8], Lakshmi et al. [9] та Yilmaz і Bilgin Güney [10] розглядаються переваги та недоліки методів механічної фільтрації, хімічної обробки, опромінення ультрафіолетом тощо, визначаються перспективні напрями вдосконалення таких технологій. Окремі публікації, наприклад Sun et al. [11] та Özdemir [12], присвячені експериментальним дослідженням ефективності конкретних технологічних рішень.

Таким чином, огляд наявної наукової літератури засвідчує актуальність та комплексність проблеми інвазії чужорідних видів через баластні води суден. Водночас, зберігається потреба в розробці більш ефективних та екологічно безпечних технологій очищення баластних вод відповідно до міжнародних стандартів.

Викладення основного матеріалу. Реалізація положень Конвенції здійснюється в поетапному режимі, причому основна частина суден, що виконують міжнародні рейси, має завершити перехідний період вже у 2024 році. Передбачається перехід більшості суден міжнародного сполучення від практики обміну баластних вод (BWE) до впровадження комплексних систем управління баластними водами (BWMS) відповідно до Правила D-2. Конвенція зобов'язує всі судна міжнародного флоту здійснювати контроль баластних вод та осадів згідно встановлених норм та індивідуальних планів менеджменту. Обов'язковими документами також є суднові журнали обліку баластних операцій та міжнародні сертифікати відповідності.

Система управління баластними водами передбачає комплекс заходів з контролю, обробки та заміни баластної води для забезпечення екологічної безпеки [4]. Особлива увага приділяється запобіганню поширенню потенційно небезпечних організмів, здатних порушити екологічну рівновагу [8-11]. Серед основних ризиків виділяють: загрозу біорізноманіттю через витіснення місцевих видів; потенційні ризики для здоров'я населення; економічні втрати у галузях, пов'язаних з використанням водних ресурсів; порушення стабільності регіональних та локальних екосистем [13, 14].

Таблиця 1 – Нормативні показники концентрації відповідно до Правила D-2 [4]

Організм і розмір	Концентрація
Будь-який організм: ≥ 50 мкм (зоопланктон)	менш ніж 10 одиниць на 1 м ³
Будь-який організм: $\geq 10 \dots < 50$ мкм (фітопланктон)	менш ніж 10 одиниць на 1 мл (10 000 000 на м ³)
Мікроби: Холера (<i>Vibrio cholerae</i>)	КУО - колонієутворювальна одиниця менш ніж 1 КУО на 100 мл або менше 1 КУО на 1г зразку зоопланктону
Кишкова паличка (<i>E. Coli</i>)	менше 250 КУО на 100 мл
Кишкові ентерококи (<i>Intestinal enterococci</i>)	менше 100 КУО на 100 мл

В таблиці 1 представлені нормативні показники концентрації відповідно до Правила D-2 вимог Конвенції ІМО щодо якості баластної води. Судновласники, що експлуатують системи менеджменту баластних вод, зобов'язані дотримуватися встановлених лімітів щодо викиду життєздатних організмів. Нормативні обмеження регламентують наступні показники: концентрація життєздатних організмів розміром від 50 мікрометрів не повинна перевищувати 10 одиниць на кубометр води, а для організмів менше 50 мікрометрів - не більше 10 одиниць на мілілітр. Додатково встановлені граничні значення для індикаторних мікроорганізмів, детальні параметри яких наведені в табл. 1.

Сучасний ринок пропонує широкий спектр систем управління баластними водами (BWMS), і технологічний розвиток у цій сфері продовжується. Однак процес впровадження ускладнюється

технічними особливостями різних типів суден та обмеженими можливостями суднобудівних підприємств щодо ефективної інтеграції цих систем [15].

Очищення баластних вод здійснюється із застосуванням комплексу фізико-механічних та хімічних методів обробки, що схематично відображено на рис. 1. Сертифіковані системи управління баластними водами (BWMS) переважно базуються на інтегрованому підході, поєднуючи декілька технологічних процесів. Первинна обробка зазвичай включає механічну сепарацію крупних частинок за допомогою фільтраційних установок або гідроциклонних пристроїв. Дрібні організми можуть проходити крізь автоматизовані самоочисні фільтрувальні системи з розміром пор близько 40 мкм.

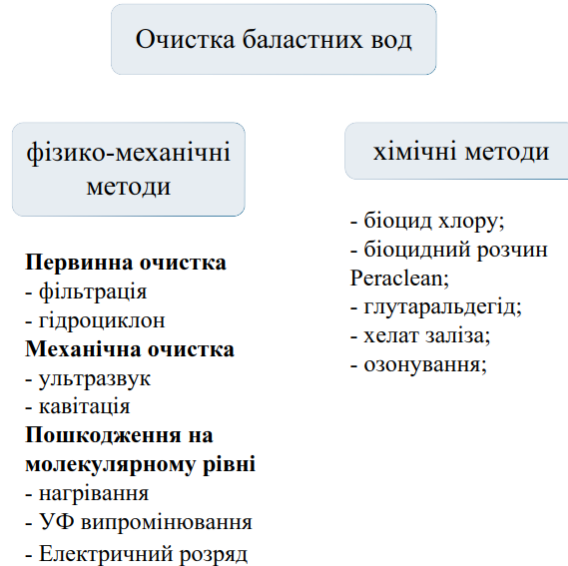
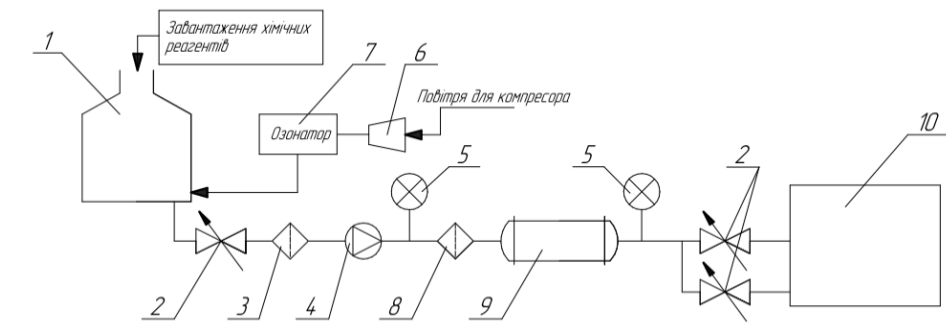


Рисунок 1 – Комплекс фізико-механічних та хімічних методів обробки

Серед інших фізичних методів обробки виділяють:

- застосування ультразвукової кавітації для механічного руйнування частинок та мікроорганізмів;
- термічну обробку з використанням високоенергетичних методів нагріву;
- знезараження ультрафіолетовим випромінюванням.

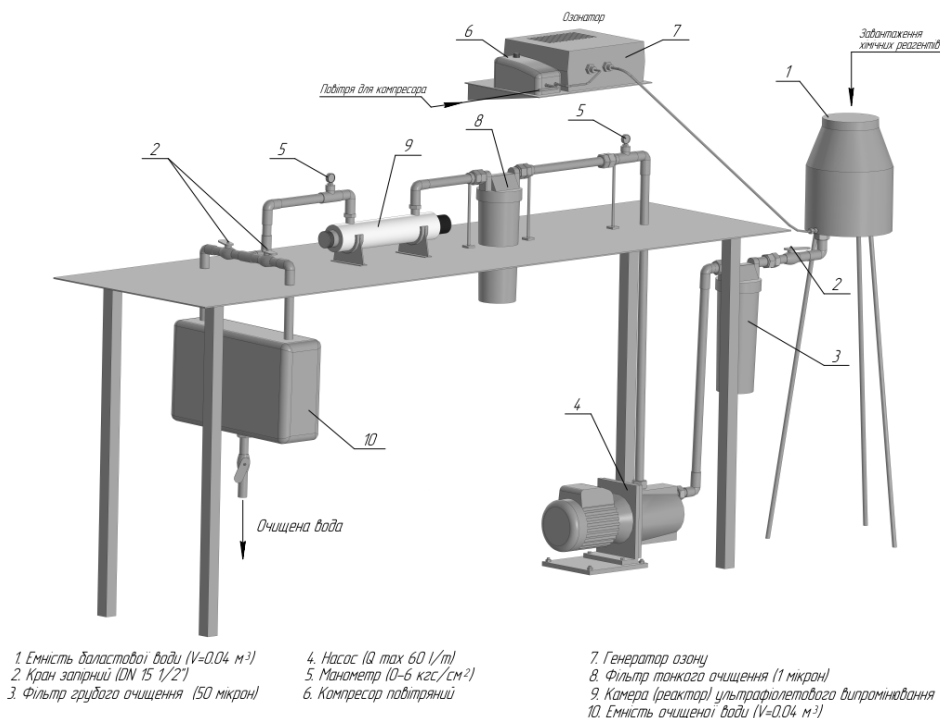
Науковий колектив Дунайський інститут Національного університету «Одеська морська академія» (ДІ НУ «ОМА») в межах виконання держбюджетної науково-дослідної роботи №0124U004399 «Розробка інноваційної технології знезараження і очищення водного баласту суден згідно стандарту якості D-2 міжнародних вимог ІМО Конвенції» створив експериментальну лабораторну установку для очищення баластних вод (рис. 3). Дослідження проводилось за фінансування Міністерства освіти і науки України.



Установка з очищення та знезараження баластових вод розроблена в Дунайському інституті НУ «ОМА»

- | | | |
|---|--|--|
| 1. Емність баластової води ($V=0.04 \text{ м}^3$) | 4. Насос ($Q \text{ max } 60 \text{ л/т}$) | 7. Генератор озону |
| 2. Кран запірний (DN 15 1/2") | 5. Манометр (0-6 кгс/см ²) | 8. Фільтр тонкого очищення (1 мікрон) |
| 3. Фільтр грубого очищення (50 мікрон) | 6. Компресор повітряний | 9. Камера (реактор) ультрафіолетового випромінювання |
| | | 10. Емність очищеної води ($V=0.04 \text{ м}^3$) |

Рисунок 2 – Технологічна схема процесу знезараження і очищення водного баласту суден



- | | | |
|---|--|--|
| 1. Емність баластової води ($V=0.04 \text{ м}^3$) | 4. Насос ($Q \text{ max } 60 \text{ л/т}$) | 7. Генератор озону |
| 2. Кран запірний (DN 15 1/2") | 5. Манометр (0-6 кгс/см ²) | 8. Фільтр тонкого очищення (1 мікрон) |
| 3. Фільтр грубого очищення (50 мікрон) | 6. Компресор повітряний | 9. Камера (реактор) ультрафіолетового випромінювання |
| | | 10. Емність очищеної води ($V=0.04 \text{ м}^3$) |

Рисунок 3. Просторова візуалізація лабораторного прототипу системи очищення баластних вод ДІ НУ «ОМА»

Науковими співробітниками ДІ НУ «ОМА» розроблено інтегроване технічне рішення – багатофункціональну систему управління водним баластом для великотоннажних морських суден. Система повністю відповідає міжнародним нормативам Правила D-2 Конвенції ІМО щодо якості баластних вод. Інноваційність запропонованого рішення полягає у поетапному застосуванні трьох типів обробки: хімічної, іонізаційної та механічної.

Процес очистки та дезінфекції баластних вод реалізується за наступною технологічною схемою, див рис 2. Початковим етапом є подача хімічних компонентів з дозувального пристрою до баластного танка (1). Дозувальний механізм забезпечує надходження у воду або хелатних сполук заліза (концентрація 8-9 г/дм³), або гіпохлориту натрію марки А (концентрація 0,2-0,4

г/дм³). Після проведення хімічної обробки водне середовище з танка (1) проходить через систему фільтрації грубих частинок (3), звідки за допомогою спеціалізованого насосного обладнання (4) спрямовується до системи тонкої фільтрації (8) та подальшої ультрафіолетової дезінфекції у спеціальній камері (9). У камері УФ-обробки (9) здійснюється завершальний етап знезараження шляхом опромінення.

Після потрібної обробки (хімічної, фільтраційної та ультрафіолетової) очищена баластна вода акумулюється у спеціальному резервуарі (10). Відповідно до розробленої методики, обробка води передбачає використання гіпохлориту натрію (0,2-0,4 г/дм³) або хелату заліза (8-9 г/дм³) з подальшою озонацією (продуктивність – 5 грамів щогодини). Завершальними етапами є послідовна фільтрація через систему грубого очищення, автоматичний фільтр тонкого очищення та фінальна обробка ультрафіолетовим випромінюванням. Розроблена система використовує комплексний підхід до знезараження, що включає три основні процеси:

1. Хімічна обробка здійснюється комбінацією гіпохлориту натрію та хелату заліза.
2. Іонізаційний етап реалізується через інноваційну конструкцію системи ультрафіолетового опромінення та іонізації. Ключовою перевагою є оптимізована геометрія розташування УФ-ламп – їх паралельне розміщення відносно напрямку руху водного потоку.
3. Механічне очищення забезпечується двоступеневою фільтрацією: через вуглецеві вставки та механічний фільтр.

Багатоетапність запропонованої системи вимагає ретельного контролю та оптимізації численних параметрів процесу, включаючи:

- фізичні характеристики (швидкість потоку, температурний режим)
- тривалість повного циклу очищення
- кількісні показники та розмірний розподіл інвазивних організмів у баластній воді

Результати досліджень. Аналіз вихідного складу баластної води показав наявність:

- життєздатних мікроорганізмів розміром 10-50 мкм за мінімальним виміром у концентрації 40 особин на 1 см³;
- індикаторних мікроорганізмів, що є референтними для оцінки санітарно-епідеміологічної безпеки, у таких кількісних показниках:

1. *Vibrio cholerae* (токсигенні штами серогруп O₁ та O₁₃₉) - 4 КУО/100 см³ або 4 КУО на грам вологої маси зоопланктонних проб.
2. *Escherichia coli* - виявлено 400 КУО/100 см³.
3. *Enterococcus spp.* - зафіксовано 400 КУО/100 см³.

Аналіз баластної води після проведення очистки за запропонованою технологією та з використанням розробленої установки продемонстрував наступні кількісні показники:

- концентрація життєздатних організмів діапазону 10-50 мкм за мінімальним виміром становила 10 особин на см³;
- рівень індикаторних мікроорганізмів, що слугують маркерами санітарно-епідеміологічної безпеки, характеризувався такими значеннями:

Токсигенні штами *Vibrio cholerae* (серогрупи O₁ та O₁₃₉) – зафіксовано менше 1 КУО/100 см³, аналогічно менше 1 КУО на грам вологої маси зоопланктонних зразків;

Показники *Escherichia coli* не перевищували 250 КУО/100 см³;

Вміст представників *Enterococcus spp.* становив менше 100 КУО/100 см³ (що відображає зниження загальної кількості кишкових ентерококів на 30%).

Документальну фіксацію експериментальних даних здійснено у протоколі досліджень. Експериментальні випробування системи очищення та дезінфекції проводились з використанням водних зразків, відібраних з акваторій Мармурового та Середземного морів. Проведений компаративний аналіз мікробіологічних показників до та після застосування розробленого лабораторного комплексу підтвердив його високу ефективність у процесах знезараження та очищення баластних вод.

Також в межах розробки лабораторного прототипу установки знезараження та очищення морської баластної води в ДІ НУ «ОМА» пропонується створення інтегрованої системи автоматизації. Основним елементом системи управління виступатиме спеціалізований щит

автоматики, що забезпечуватиме контроль та керування всіма технологічними процесами установки.

Система автоматизації передбачає управління наступними електротехнічними компонентами: циркуляційний насос, система ультрафіолетового знезараження, система аерації та озонування.

Щит автоматики забезпечить узгоджену роботу всіх компонентів установки, контроль їх технічного стану та захист від аварійних режимів експлуатації, див. рис. 3.

Система автоматизації забезпечує реалізацію наступних функціональних можливостей:

1. Регулювання витрати води:

- плавне регулювання потоку через УФ-камеру в діапазоні 0-100%;
- застосування частотного перетворювача для управління насосом;
- моніторинг тиску води за допомогою датчика з аналоговим виходом 4-20 мА;
- дистанційне керування через виносний потенціометр.

2. Контроль озонування:

- програмоване налаштування тривалості обробки (від 1 хв до 1 год);
- синхронізоване управління озонатором та компресором;
- гнучке програмування режимів обробки.

3. Управління УФ-знезараженням:

- режим промивання системи (без активації УФ-лампи);
- режим знезараження (з активованою УФ-лампюю);
- програмований вибір режиму роботи.

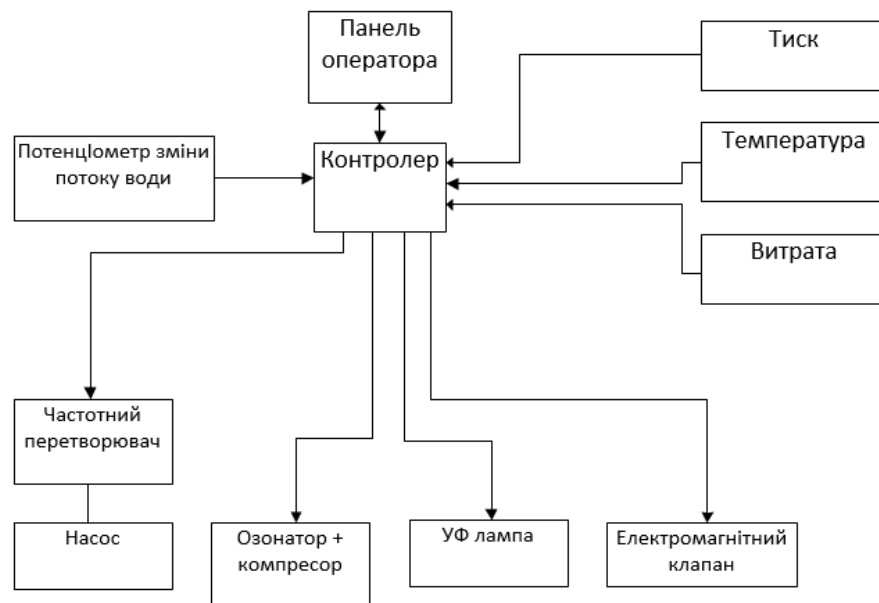


Рисунок 3 – Структурна схема системи автоматизації експериментальної установки очищення баластних вод

4. Система моніторингу та візуалізації:

- індикація стану УФ-лампи;
- контроль процесу озонування;
- відображення тиску в системі;
- моніторинг витрати води;
- контроль температурного режиму;
- фіксація часу та дати обробки;
- ідентифікація точки відбору проб.

5. Програмування режимів очищення:

- налаштування тривалості озонування;
- встановлення цільових показників витрати води;
- збереження програм обробки.

6. Автоматизація фільтрації:

- керування електромагнітним клапаном саморозвантажувального фільтра;
- програмування циклів промивки.

Система передбачає можливість розширення функціоналу та інтеграції додаткових контрольно-вимірювальних приладів.

Для успішної реалізації проекту формується міжнародна експертна команда, до якої залучені провідні турецькі науковці, експерти Міжнародної морської організації (ІМО), фахівці сучасної лабораторної бази.

Висновок. Підсумовуючи результати дослідження, варто зазначити наступне. Для впровадження систем управління баластними водами необхідне отримання сертифікації від уповноважених національних органів згідно з процедурами, встановленими ІМО. Верифікація очисних систем передбачає комплексні випробування як в берегових умовах, так і в реальних суднових умовах для підтвердження їх відповідності нормативним показникам ефективності.

Сучасні технологічні рішення базуються на різних методах обробки, включаючи фільтрацію, ультрафіолетове опромінення та електрохлорування. Проте існуючі системи мають певні обмеження, серед яких:

- значне енергоспоживання;
- зниження ефективності при підвищеній мутності води;
- погіршення УФ-проникності за наявності високих концентрацій розчинених органічних сполук.

Аналітичне порівняння рівнів мікробіологічного забруднення у вихідних та оброблених пробах засвідчило ефективність функціонування створеної лабораторної установки очищення та знезараження баластних вод.

Створена науковцями Дунайського інституту технологія очищення баластних вод наразі перебуває на етапі проходження процедур типового схвалення та сертифікаційних випробувань згідно з чинними нормативними вимогами.

Подяки. НДР №0124U004399 виконувалась за рахунок фінансування МОН в рамках міжнародного науково-технологічного білатерального співробітництва відповідно до Протоколу 7-го засідання українсько-турецького Спільного Комітету з науково-технологічного співробітництва.

REFERENCES

1. Tsolaki, E., & Diamadopoulos, E. (2009). Technologies for ballast water treatment: A review. *Journal of Chemical Technology & Biotechnology*, 85(1), 19–32. <https://doi.org/10.1002/jctb.2276>
2. International Maritime Organization. *International Maritime Organization (IMO)*. <https://www.imo.org/> (Accessed October 1, 2024)
3. Verkhovna Rada of Ukraine. (2004). *International Convention for the Control and Management of Ships' Ballast Water and Sediments, 2004*. https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/896_050#Text (Accessed August 10, 2024).
4. International Maritime Organization. (2016). *Resolution MEPC.279(70). Guidelines for approval of ballast water management systems (G8), 2016. Annex 5 (42 pages)*. [https://wwwcdn.imo.org/localresources/en/KnowledgeCentre/IndexofIMOResolutions/MEPCDocuments/MEPC.279\(70\).pdf](https://wwwcdn.imo.org/localresources/en/KnowledgeCentre/IndexofIMOResolutions/MEPCDocuments/MEPC.279(70).pdf) (Accessed October 12, 2024)
5. Lakshmi, E., Priya, M., & Achari, V. S. (2021). An overview on the treatment of ballast water in ships. *Ocean & Coastal Management*, 199, 105296. <https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2020.105296>
6. Bailey, S. A., Brydges, T., Casas-Monroy, O., Kydd, J., Linley, R. D., Rozon, R. M., & Darling, J. A. (2022). First evaluation of ballast water management systems on operational ships for minimizing

- introductions of nonindigenous zooplankton. *Marine Pollution Bulletin*, 182, 113947. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2022.113947>
7. David, M., Gollasch, S. (2015). Ballast Water Management Systems for Vessels. *Global Maritime Transport and Ballast Water Management. Invading Nature - Springer Series in Invasion Ecology*, vol 8. Springer, Dordrecht. https://doi.org/10.1007/978-94-017-9367-4_6
8. Liu, H. (2023). Study on Ship Ballast Water Treatment Methods. *Highlights in Science, Engineering and Technology*, 72, 783-787. <https://doi.org/10.54097/kyy8mm53>
9. Lakshmi, E., Priya, M., & Achari, V. S. (2021). An overview on the treatment of ballast water in ships. *Ocean; Coastal Management*, 199, 105296. <https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2020.105296>
10. Yilmaz, M. & Bilgin Güney, C. (2023). Evaluation of ballast water treatment systems from the perspective of expert seafarers' ship experiences. *Brodogradnja*, 74 (4), 129-154. <https://doi.org/10.21278/brod74407>
11. Sun, Y., Zhao, Y., Sheng, S., Wang, Y., & Zhou, H. (2021). Experimental study on photocatalytic treatment of alien organisms in ship ballast water by F/CE-tio₂. *Journal of The Institution of Engineers (India): Series C*, 102(6), 1429–1436. <https://doi.org/10.1007/s40032-021-00766-9>
12. Özdemir, Ü. (2022). A quantitative approach to the development of ballast water treatment systems in ships. *Ships and Offshore Structures*, 18(6), 867–874. <https://doi.org/10.1080/17445302.2022.2077544>
13. Outinen, O., Bailey, S. A., Casas-Monroy, O., Delacroix, S., Gorgula, S., Griniene, E., Kakkonen, J. E., & Srebalienė, G. (2024). Biological testing of ships' ballast water indicates challenges for the implementation of the Ballast Water Management Convention. *Frontiers in Marine Science*, 11. <https://doi.org/10.3389/fmars.2024.1334286>
14. Amidi, R., & Fatemi, S. M. (2024). Investigation and evaluation of risk of pathogen transfer by Ballast Water in Shahid Rajaei Port, Hormozgan Province, Iran. *Environmental Monitoring and Assessment*, 196(12). <https://doi.org/10.1007/s10661-024-13329-z>
15. Zatoń-Sieczka, K., & Czerniejewski, P. (2024). The impact of microorganisms transported in ships' ballast water on the fish of the estuarine waters and environmental sustainability in the southern Baltic Sea. *Sustainability*, 16(12), 5229. <https://doi.org/10.3390/su16125229>
16. Effendi, I., Ghifari, M. F., Nedi, S., & Effendi, S. (2024). Electrocoagulation system for treatment of Ballast Water. *Carpathian Journal of Earth and Environmental Sciences*, 19(2), 217–232. <https://doi.org/10.26471/cjees/2024/019/293>

V. I. Zalozh, N. B. Tiron-Vorobiova, A. H. Danylyan

INNOVATIVE APPROACHES TO AUTOMATION OF SHIP'S BALLAST WATER TREATMENT AND DISINFECTION PROCESSES

This research introduces innovative technology for ship's ballast water treatment and disinfection that meets the International Maritime Organization's D-2 water quality standard requirements. The innovative approach to ballast water processing has been developed and validated by the research team at the Danube Institute of the National University "Odessa Maritime Academy" as part of the state-funded research project No. 0124U004399, supported by the Ministry of Education and Science of Ukraine. The study emphasizes the critical role of ballast water in modern maritime navigation, particularly its significance for vessel stability and operational safety. However, the presence of numerous marine organisms in ballast water poses significant multidimensional challenges, ranging from threats to ecological balance to economic losses and sanitary-epidemiological risks. The transfer of ballast water between different geographical locations facilitates the invasion of non-indigenous microorganisms into new ecosystems, potentially leading to the destruction of local biota and causing substantial economic losses in coastal regions. The developed experimental facility implements a comprehensive approach to ballast water treatment through the sequential application of chemical, ionization, and mechanical processing methods. A key objective is the creation of an automated control system for the experimental ballast water treatment equipment, designed to ensure precise monitoring of technological parameters and optimize laboratory testing efficiency.

The developed multifunctional ballast water management system is designed for large-tonnage vessels and fully complies with D-2 standard requirements. Experimental studies have confirmed the high efficiency of the proposed technology in eliminating pathogenic microorganisms and purifying ballast water, as documented by laboratory test results. Currently, the system is undergoing type approval and certification procedures in accordance with international standards.

Keywords: ballast water, marine vessels, treatment, disinfection, invasive species, control system