

УДК 621.43

ОБЕСПЕЧЕНИЕ ТЕХНОСФЕРНОЙ БЕЗОПАСНОСТИ МОРСКОГО ТРАНСПОРТА: СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ СИСТЕМ ОБРАБОТКИ БАЛЛАСТНЫХ ВОД

Костылев Иван Иванович¹, д.т.н., профессор, заведующий кафедры Теплотехники, Судовых котлов и Вспомогательных установок

e-mail: KostylevII@gumrf.ru

Диденко Вадим Дмитриевич¹, аспирант кафедры Теплотехники, Судовых котлов и Вспомогательных установок

e-mail: vadim.fpaye@bk.ru

¹ Государственный университет морского и речного флота имени адмирала С.О. Макарова, Санкт-Петербург, Россия

Аннотация. Статья посвящена системному сравнительному анализу технологий обработки балластных вод, применяемых на морских судах в соответствии с требованиями Конвенции «О контроле судовых балластных вод и осадками, и управления ими 2004». Рассмотрены основные типы систем: электрохлорирование, ультрафиолетовое облучение, фильтрация, озонирование и гибридные решения. На основе данных сертификации Type Approval (ИМО, 2025), технической документации производителей и результатов независимых испытаний проведена оценка по пяти критериям: эффективность обеззараживания, энергопотребление, зависимость от параметров воды, образование вторичных загрязнителей, а также стоимость жизненного цикла. Установлено, что ни одна из технологий не обеспечивает универсальной применимости: электрохлорирующие системы теряют эффективность в пресных водах, УФ-установки чувствительны к мутности, а озонирование экономически нецелесообразно при больших объёмах. Наибольшую адаптивность демонстрируют модульные гибридные комплексы ((фильтрация +УФ/электрохлорирование), однако их эксплуатация требует высокой квалификации экипажа и регулярного технического обслуживания. Также обоснована необходимость внедрения интеллектуальных систем управления, учитывающих реальные параметры воды в режиме реального времени. Результаты исследования могут быть использованы при выборе системы обработки балластных вод для торгового флота Российской Федерации, а также суда, эксплуатирующийся на Северном морском пути.

Ключевые слова: балластные воды, ИМО, обработка балластных вод, электрохлорирование, УФ-излучение, инвазивные воды, Type Approval.

ENSURING TECHNOSPHERE SAFETY OF MARITIME TRANSPORT: A COMPARATIVE ANALYSIS OF BALLAST WATER TREATMENT SYSTEMS

Ivan I. Kostylev¹, Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of Heat Engineering, Ship Boilers and Auxiliary Installations

e-mail: KostylevII@gumrf.ru

Vadim D. Didenko¹, Postgraduate student, Department of Heat Engineering, Ship Boilers and Auxiliary Installations

Abstract. This paper presents a systematic comparative analysis of ballast water treatment systems employed on maritime vessels in compliance with the International Convention for the Control and Management of Ships' Ballast Water and Sediments (BWM Convention), 2004. The main system types reviewed include electrochlorination, ultraviolet (UV) irradiation, and filtration, ozonation, and hybrid configurations. The evaluation was conducted based on IMO Type Approval certification data (2025), manufacturers' technical specifications, and independent test results, assessing five key criteria: disinfection efficiency, energy consumption, sensitivity to water quality parameters, formation of secondary pollutants, and life cycle cost. The results indicate that no single technology offers universal applicability: electrochlorination systems exhibit reduced efficiency in freshwater, UV systems are highly sensitive to water turbidity, and ozonation proves economically unviable for large-volume operations. Modular hybrid systems (e.g., filtration combined with UV or electrochlorination) demonstrate the highest operational adaptability; however, their deployment requires highly trained crewmembers and rigorous maintenance schedules. The study also substantiates the need for intelligent control systems capable of dynamically adjusting to real-time water quality parameters. The findings can be applied to support the selection of ballast water treatment systems for the Russian commercial fleet, particularly for vessels operating along the Northern Sea Route.

Keywords: ballast water; IMO; ballast water treatment; electrochlorination; ultraviolet (UV) irradiation; aquatic invasive species; Type Approval.

Введение

Ежегодно мировой флот перекачивает свыше 10 миллиардов тонн балластных вод для обеспечения устойчивости и манёвренности судов. Вместе с ними осуществляется трансграничный перенос микроорганизмов, планктонов, личинок и даже мелких рыб, что приводит к биологическим инвазиям и нарушению экологического баланса в прибрежных зонах. Ярким примером стали вспышка *Mnemiopsis leidyi* в Чёрном море в 1980-х гг. и колонизация зебровидной мидии (*Dreissena polymorpha*) Великих озёр Северной Америки [1]. По оценкам Всемирного банка, экономический ущерб от инвазивных видов, занесённых через балластные воды, превышает 100 миллиардов долларов в год [2].

В ответ на вызовы глобальной эко-безопасности Международная морская организация (ИМО) разработала Конвенцию по контролю и управлению балластными водами и осадками, принятую в 2004 году и вступившую в силу с 8 сентября 2019 года. Согласно стандарту D-2 Конвенции, после обработки в 1 мл балластной воды объёмом ≤ 1 мкм не должно содержать более 10 жизнеспособных организмов, а для организмов размером 10-50 мкм – не более 10 на 1 мл. Кроме того, допускается не более 250 колониеобразующих единиц (КОЕ) *Vibrio cholera*, *E. Coli* и *Enterococcus* на 100 мл [3].

Исполнение требований Конвенции реализуется через установку на суда систем обработки балластных вод (Ballast Water Management System, BWMS), прошедших процедуру Type Approval в признанных организациях (например, DNV, LR, BV). На начало 2025 года ИМО зарегистрировала 74 одобренных системы, использующие более 10 различных технологических принципов [4]. Цель данной статьи – произвести комплексный сравнительный анализ существующих BWMS с позиций эффективности, надежности, а также экологической безопасности.

Методы и Материалы

В основу данного исследования лёг анализ данных из трёх источников:

1. Официальная база данных IMO GESAMP-BWWG (2025);
2. Технические паспорта и отчёты о полевых испытаниях ведущих производителей (Alfa Laval, Wartsila, Techcross, Evoqua, Headway);
3. Научные публикации за 2018-2025 года.

Оценка проводилась по следующим критериям:

- **Эффективность**—соответствие стандарту D-2 в лабораториях и полевых условиях;
- **Энергоёмкость**— $\text{кВт} \cdot \text{ч} / \text{м}^3$ обработанной воды;
- **Зависимость от параметров воды**: солёность (S , ‰), температура (T , °C), мутность (TSS, NTU);
- **Вторичное загрязнение**: образование остаточного хлора, тригметанов (TRB), озона;
- **CAPEX/OPEX**—капитальные и эксплуатационные затраты (на 10 лет службы).

Анализ технологий обработки балластных вод

Электрохлорирование. Принцип данной установки основан на электролизе морской воды с образованием гипохлорита натрия (NaOCl), обладающего высокой окислительной способностью. Эффективность превышает 99,9 % для бактерий и 95% для зоопланктона при $S \geq 25$ ‰ [5]. На рисунке 1 представлена принципиальная схема системы электрохлорирования.



Рисунок 1 – Принципиальная схема системы электрохлорирования

Преимущества: высокая производительность (до $3000 \text{ м}^3/\text{ч}$), устойчивость к механическим примесям, низкая чувствительность к температуре ($-2 \dots +35^\circ\text{C}$).

Недостатки:

- Резкое падение эффективности при $S < 5$ ‰ (пресная вода);
- Коррозия трубопроводов и балластных танков (требуется ингибиторы);
- Необходимость хранения реагентов на борту.

Основными представителями данных систем являются следующие производители: BalPure (Evoqua), HydroLNG (Headway), OceanGuard (Techcross).

Ультрафиолетовое (УФ) облучение. УФ-излучение ($\lambda=254 \text{ нм}$) разрушает ДНК/РНК микроорганизмов, делая их неспособными к размножению [6]. На рисунке 2 представлена принципиальная схема системы ультрафиолетового облучения.

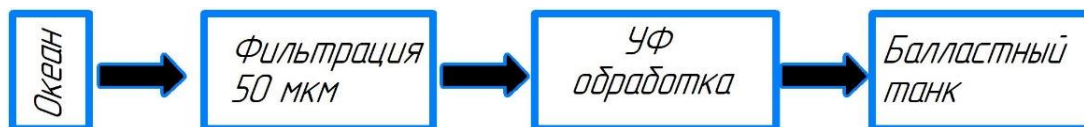


Рисунок 2 – Принципиальная схема системы ультрафиолетового облучения

Преимущества: отсутствие химических реагентов, низкий OPEX, экологическая чистота сброса.

Недостатки:

- Резкое снижение эффективности при $TSS > 25$ NUT (например, в устьях рек, портах с дноуглублением);
- Чувствительность к биообрастанию ламп;
- Необходимость предварительной фильтрации (до 40-50 мкм), что увеличивает массу и энергопотребление.

Основными представителями данных систем являются следующие производители: PureBallast (Alfa Laval), OptiClean (Wartsila), Navilis (Scanship).

Гибридная система (фильтрация+ УФ/химия). Иногда совмещают механическую (фильтры 40-100 мкм) и физико-химическую (УФ, электрохлорирование) стадии. Это позволяет снизить нагрузку на основной модуль и повысить стабильность работы.

Преимущества:

- Универсальность (работают как в морской, так и в соленой воде);
- Высокая надежность при варьировании параметров воды;
- Соответствие D-2 в 98% полевых тестов (по данным DNV, 2024).

Недостатки:

- Повышение CAPEX (на 25-40% выше, чем у монотехнологий);
- Сложность обслуживания (фильтры требуют промывки каждые 2-4 часа);
- Необходимость резервирования модулей.

Наиболее распространённая модернизация данной схемы является Alfa Laval PureBallast 3.0 (фильтрация + УФ), Ecoschlor (фильтрация + хлорирование с нейтрализацией).

Озонирование. Озонирование (например, OceanSaver) обладает широким спектром действия, но требует высоких энергозатрат (до $1,8 \text{ кВт} \cdot \text{ч} / \text{м}^3$) и сложные системы безопасности из-за токсичности азота. В настоящее время его доля на рынке не превышает и 5% [5].

В таблице 1 показаны сравнительные характеристики технологий систем обработки балластных вод.

Таблица 1. Современные характеристики систем обработки балластных вод

Показатель	Электрохлорирование	УФ-обработка	Гибридная система
Эффективность (соотв. D-2)	92-98%	85-96%*	95-99%
Энергопотребление, $\text{кВт} \cdot \text{ч} / \text{м}^3$	0,15-0,3	0,4-0,8	0,5-0,9
Рабочая солёность, ‰	5-45	0-45	0-45
Максимальное TSS, NTU	100	25	50
Остаточные биоциды	Да (Cl_2 , TRB)	Нет	Да/Нет (зависит от модуля)
CAPEX (на $1000 \text{ м}^3 / \text{ч}$)	0,8-1,2 млн \$	1,0-1,5 млн \$	1,3-2,0 млн \$

* при наличии предфильтрации; без неё эффективность УФ падает до 60-70% при $TSS > 25$ NUT.

Ключевые ограничения и пути развития

Анализ показывает, что главным барьером универсальности BWMS является динамичность параметров природных вод. Так, суда, работающие в Балтийском море ($S=3-7\text{‰}$), сталкиваются с нестабильной работой электрохлорирующих систем, в то время как в устье рек Амура и Лены высокая взвешенность делает УФ-обработку малоэффективной.

Кроме того, выявлены следующие системные проблемы:

- **Несоответствие лабораторных и полевых испытаний:** 28% систем, прошедшие Type Approval, не обеспечивают D-2 в реальных рейсах (по данным российский PSC-инспекций, 2024) [7];
- **Отсутствие стандарта по мониторингу эффективности:** большинства BWMS не имеют встроенных биосенсоров, контроль проводится разово-при инспекции;
- **Высокие затраты на ретрофиттинг:** модернизация старого флота (особенно в Арктике) экономически затруднительна.

Перспективным направлением является развитие адаптивных BWMS с элементами искусственного интеллекта: датчики→автоматическая настройка режима→учёт данных в система учёта углеродного следа (IMO DCS). Некоторые производители уже тестируют такие решения (например, Alfa Laval PureBallast Smart).

Заключение

На современном этапе отсутствует «идеальная» технология по обработке балластных вод. Выбор системы по обработке балластных вод должен осуществляться с учётом профиля судна (тип, тоннаж, район плавания), требований портов-реципиентов и жизненного цикла системы.

Гибридное решение, несмотря на высокую стоимость, обеспечивает наибольшую гарантию соответствия стандарт D-2 в разнообразных условиях, включая российские акватории (Балтика, Баренцево море, Северный морской путь). Вместе с тем, для малых судов и вспомогательного флота целесообразно применение упрощённых УФ-систем с ручным управлением.

Для повышения экологической безопасности к сведению следует принять следующие рекомендации:

1. Ввести обязательные полевые испытания при Type Approval;
2. Разработать единый протокол мониторинга эффективности BWMS;
3. Стимулировать разработку безреагентных и низко-энергоёмких технологий, особенно для арктического судоходства.

Реализация этих мер позволит минимизировать риски биологических инвазий и усилить экологическую устойчивость морского транспорта в условиях интенсивности судоходства.

Список литературы:

1. David M., Gollasch S. Global Maritime Transport and Ballast Water Management: Issues and Solutions. Second Edition. January 2015. Vol. 27.
2. Phillip J. Haubrock, Teun Everts, and other. The impacts of biological invasions. Cambridge Philosophical Society. Biological reviews. 2025. Vol. 56.
3. International Maritime Organization. International Convention for the Control and Management of Ships' Ballast Water and Sediments, 2004. London, 2004. Vol. 38. – URL: <https://library.arcticportal.org/1913/1/International%20Convention%20for%20the%20Control%20and%20Management%20of%20Ships%27%20Ballast%20Water%20and%20Sediments.pdf> (дата обращения: 24.04.2026)
4. International Maritime Organization. List of ballast water management systems that make use of Active Substances which received Basic and Final Approval. London, 2025. Vol. 27. – URL: <https://wwwcdn.imo.org/localresources/en/OurWork/Environment/Documents/Biofouling%20pages/BWM.2-Circ.34-Rev.14%20-%20List%20of%20ballast%20water%20management%20systems%20that%20make%20use%20of%20Active%20Substances%20which%20received...%20%28Secretariat%29.pdf> (дата обращения: 21.04.2026)



5. K.G. Nadeeshani Nanayakkaran, Yu-Ming Zheng, and other. Electrochemical disinfection for ballast water management: Technology development and risk assessment. Marine Pollution Bulletin, 2011. Vol. 63, P. 119-123.
6. Alfa Laval. Ballast water management: An overview of regulations and ballast water treatment technologies. 2017. – URL: https://safety4sea.com/wp-content/uploads/2017/02/Alfa-Laval-Pureballast-white-paper-2017_02.pdf (дата обращения: 15.04.2026)
7. РМРС. Руководство по применению требований конвенции о контроле судовых балластных вод и осадками и управления ими 2004 года. Санкт-Петербург, 2017 г.

