



ПОРІВНЯЛЬНА ОЦІНКА ЕНЕРГЕТИЧНОЇ ЕФЕКТИВНОСТІ СПОСОБІВ ОБРОБКИ БАЛАСТНИХ ВОД

Горбов В.М., Мітенкова В.С., Тимофєєва А.С.

Національний університет кораблебудування ім. адмірала Макарова, м. Миколаїв

Виконана оцінка додаткових витрат енергії для різних варіантів схемних рішень обробки баластних вод на борту судна. Проведений аналіз енергоспоживання та тривалості різних механічних, фізичних та хімічних способів очистки заборотної води. Отримано залежності витрат напору та додаткової електричної потужності в баластній системі від продуктивності для різних способів обробки заборотної води на судні.

Ключові слова: баластні води, енергетична ефективність, фільтрація, ультрафіолетове знезараження води, електрохімічна обробка, хлорування.

Постановка проблеми. Технологія перевезення вантажів водним транспортом передбачає наявність на борту судна певної кількості заборотної води (баласту) для забезпечення остійності та осадки судна при його переходах порожнем. У забортній воді містяться різні живі організми, що можуть зберігати здатність до життєдіяльності навіть після тривалих морських переходів. Скидання баласту, що містить чужорідні для даного району організми, може завдати шкоди рибальству, колоніям коралів, аквакультурним фермам й іншим сферам господарчої діяльності, стати причиною виникнення інфекцій [1-3].

Зростаюче міжнародне значення проблеми переносу морських організмів з водняним баластом призвело до створення відповідних законодавчих документів як на регіональних рівнях, так і на рівні ООН та ІМО [4, 5]. У зв'язку з цим є досить актуальним питання обробки баластних вод для запобігання скиданню небажаних мікроорганізмів зі суден в портах.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. У багатьох країнах проводяться дослідження методів обробки баластних вод. Серед низки існуючих методів обробки баласту одним із найбільш перспективних вважається очищення заборотної води на борту судна [6, 7]. Враховуючи актуальність даної тематики, є ряд публікацій, присвячених різним способам обробки. Так, у звіті, представленому Американським бюро судноплавства (ABS), проведено огляд та порівняння систем та окремого обладнання для очищення баласту різних виробників [8]. Ґрунтовне дослідження ефективності обробки заборотної води хлором приведено в роботі [9]. Оцінка економічної ефективності, капітальних та експлуатаційних витрат для різних способів обробки заборотної води було проведено американськими дослідниками [10]. Дослідження обробки заборотної води об'ємним шляхом у баластних танках та електрохімічним способом представлені у наукових публікаціях [11] та [12], відповідно.

Схеми обробки баластної води на суднах включають комплекс обладнання, де відбуваються процеси механічної, фізичної та хімічної очистки. У відомих публікаціях не розглядаються питання оцінки ефективності схем з використанням декількох методів поспіль. Оскільки дана наукова задача є відносно новою, оцінці енергетичної ефективності процесів очищення баластних вод також раніше не присвячувалося достатньо уваги.

Мета статті – оцінка витрат енергії для роботи систем очищення баластних вод при використанні послідовності різних процесів механічної та фізико-хімічної обробки.

Виклад основного матеріалу. На сьогоднішній день виділяють п'ять основних методів обробки баластних вод.

Перший метод – виключення скидання баласту взагалі. Це найнадійніший спосіб, він застосовується в тих випадках, якщо скидання баластних вод заборонено повністю. Однак даний спосіб не є практичним [13].

Другий метод – зменшення концентрації морських організмів, що містяться в



прийнятому на борт водяному баласті. Це може бути досягнуто шляхом обмеження кількості прийнятого водяного баласту, а також шляхом вибору місць прийому баласту (не слід приймати баласт на малих глибинах, у районах застою води, поблизу від місць зливу стічних вод і днопоглиблювальних робіт і районів виявлення патогенних мікроорганізмів) [7].

Третій метод полягає в обробці водяного баласту на борту судна. На даний час розроблено певні технології цього методу, рекомендовані керівництвом ІМО[8].

Четвертий метод – берегова обробка – за оцінками Американського Бюро Судноплавства має ряд переваг. Однак необхідно врахувати, що багато суден не мають можливості здавати водяний баласт на берегові приймальні споруди. Що стосується портів, то далеко не всі з них можуть надати судну відповідні приймальні споруди. При цьому малоймовірно, що найближчим часом порти почнуть будувати приймальне обладнання для водяного баласту, маючи ще багато не вирішених проблем з прийомним обладнанням, необхідним відповідно до правил Конвенції МАРПОЛ.

П'ятий метод полягає в зміні баласту у водах відкритого океану або його розбавленні.

На сьогоднішній день найбільш ефективним у поєднанні з надійністю та можливістю необмеженого застосування на судах є третій метод, що передбачає обробку баласта на борту судна. Така обробка може здійснюватися наступними способами [8]:

- фізичним (нагрівання, обробка ультразвуком, ультрафіолетовим випромінюванням, магнітним полем, іонізація сріблом, і т.п.);
- механічним (фільтрування, внесення змін у конструкцію судна, застосування спеціальних покриттів танків і т.п.);
- хімічним (озонування, видалення кисню, хлорування, застосування біореагентів і т.п.);
- біологічним – шляхом додавання в баластну воду хижих або паразитних організмів з метою знищення шкідливих мікроорганізмів.

Серед перерахованих способів поки немає достатньо ефективних і економічних. Так, наприклад, механічна обробка шляхом сепарування або фільтрування займає багато часу і не забезпечує відділення мікроорганізмів, вона потребує видалення відкладень, що утворюються в результаті фільтрування.

Застосування хімічної обробки (найдоступніший поки спосіб) може спричинити ряд проблем:

- очевидний ризик для здоров'я екіпажу;
- висока швидкість корозії баластних насосів, трубопроводів, покриттів танків та інших частин баластної системи;
- забруднення цими хімікатами морського середовища в результаті їх скидання разом з баластом.

Фізичний вплив від ультрафіолетових променів, ультразвуку, нагрівання баластної води також несе великий ризик для здоров'я екіпажу, може викликати корозію корпусних конструкцій, а у разі скидання гарячої води – пошкодити місцеву морську екосистему. Суттєвий недолік при використанні фізичного впливу – відсутність гарантії знищення патогенних мікроорганізмів [1].

Обробку баласту на борту судна можна умовно розділити на два етапи: твердо-рідинне розподілення та дезінфекція [4]. Твердо-рідинне розподілення здійснюється шляхом фільтрування або застосування гідроциклону. Дезінфекція видаляє і/або деактивує мікроорганізми, використовуючи один чи декілька наступних методів [4]:

- хімічна інактивація мікроорганізмів біоцидами (біоциди, що окислюються – загальні дезінфікуючі засоби, які активуються, руйнуючи органічні структури, такі як клітинні мембрани, або нуклеїнові кислоти; біоциди, що не окислюються, впливають на репродуктивні, нервові, або метаболічні функції організмів);
- фізико-хімічна інактивація мікроорганізмів за допомогою процесів, таких як ультрафіолетове світло, висока температура або кавітація;
- дезоксидація – процес видалення кисню з води, внаслідок чого настає асфіксія



мікроорганізмів.

Більшість широко розповсюджених систем включає дві або більше стадії обробки баластних вод (рис. 1).

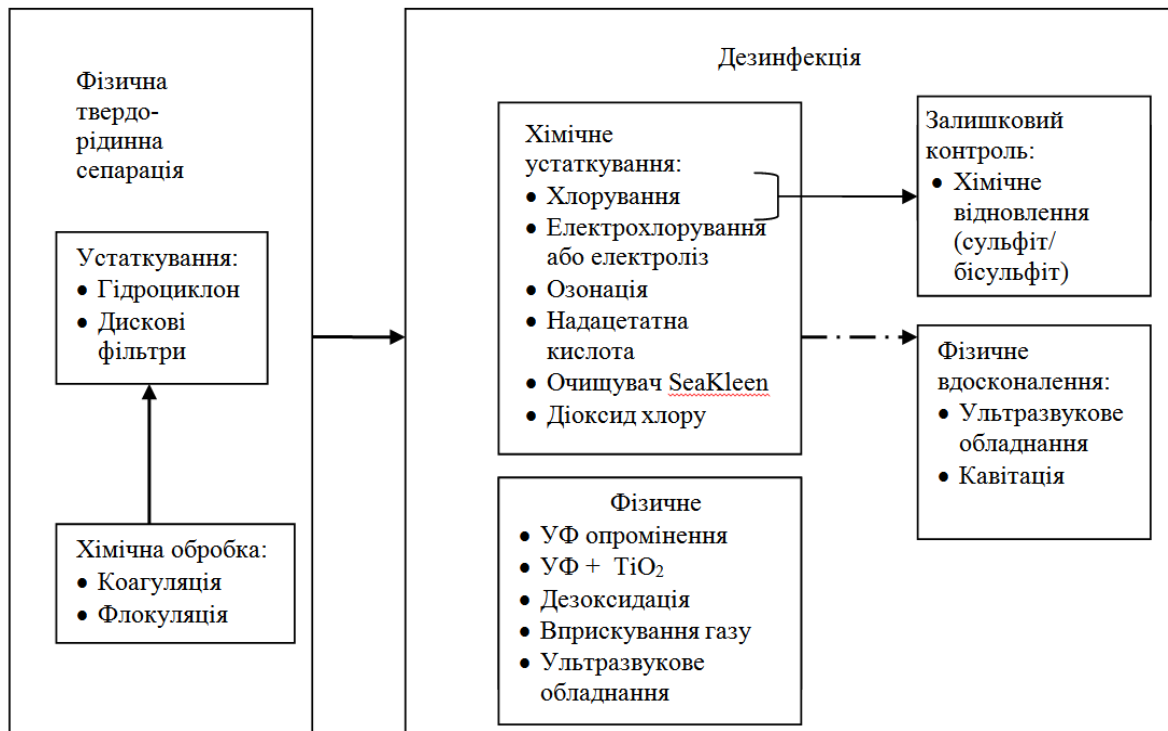


Рисунок 1 – Способи обробки баластних вод

На практиці застосовують наступні способи обробки баластних вод:

- коагуляцію
- фільтрування;
- розділення фаз під дією відцентрових сил в гідроциклонах;
- дезінфекція ультрафіолетовим випромінюванням;
- електрохімічна обробка;
- хлорування.

Варіанти поєднання процесів очищення баластних вод наведено на рис. 2.

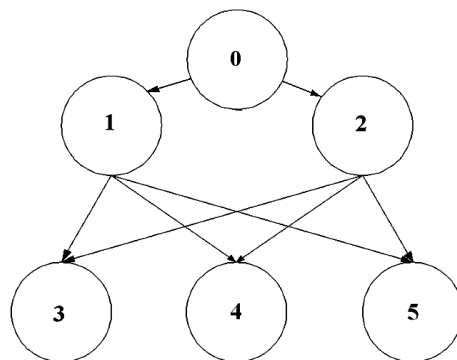


Рисунок 2 – Схема можливих послідовностей застосування способів обробки баластної води в системі очищення: 0 – коагуляція; 1– фільтрування; 2 – розділення в гідроциклоні; 3 – дезінфекція ультрафіолетовим промінням; 4 – електрохімічна обробка; 5 – хлорування

Наявність додаткового очисного обладнання буде напряму (за рахунок споживання додаткової кількості енергії із електричної системи судна) або опосередковано (додатковий місцевий опір в системі, що призводить до підвищених втрат тиску, як наслідок, потрібні відцентрові насоси з більш потужним електроприводом) впливати на енергоспоживаність баластної системи. Також слід враховувати тривалість процесів обробки, оскільки час



проведення баластних операцій, під час яких і здійснюється очищення забортної води, є обмеженим.

Розглянемо основні процеси обробки баластних вод докладніше з метою визначення їх впливу на енергетичну ефективність та тривалість очищення баласту у системі.

При *коагуляції* відбувається укрупнення дрібнодисперсних та колоїдних часток, у результаті чого збільшується швидкість їх осадження, а також можливість затримування пористими фільтруючими матеріалами. Для отримання колоїдів в воду, що обробляється, вводять добре розчинні сірчаноокислі (або хлористі) солі цих металів, які в результаті гідролізу утворюють малорозчинні гідрати оксидів цих металів. Фізико-хімічний процес коагуляції не потребує додаткових витрат енергії та займає в залежності від характеристик забортної води декілька секунд [14].

Час *фільтрації* можна оцінити за її швидкістю, яку на практиці визначають за рівнянням Козені-Кармана [15]:

$$u = \frac{\varepsilon^3 \varphi^2 d_{av}^2}{36\mu KT^2(1-\varepsilon)^2} \frac{\Delta p}{h_0}, \quad (1)$$

де ε – пористість матеріалу, що залежить від типу фільтруючого матеріалу; φ – фактор форми, що для сферичних частинок дорівнює 1,0; d_{av} – середній діаметр зерен в шарі, м; μ – динамічна в'язкість речовини, Па·с; K – коефіцієнт, який залежить від форми поперечного перерізу каналу; T – середня довжина пористих каналів, м; Δp – перепад тиску в фільтрі (залежить від характеристик фільтра), Па; h_0 – товщина пористого матеріалу, м.

Встановлення фільтрів суттєво впливає на збільшення втрат тиску в баластній системі і, як наслідок, на напір і потужність електродвигунів насосів.

В гідроциклоні на відміну від фільтрів відділення домішок з забортної води відбувається не в потоці, а в об'ємі. Враховуючи значні об'єми баласту, що приймаються на сучасні транспортні судна та обмежений час проведення баластних операцій, гідроциклони не знайшли поширення на водному транспорті за виключенням малих суден.

Час, що потребується для очищення води в гідроциклонах можна визначити за формулами (2) і (3) [16]:

$$t = \frac{V}{q}, \quad (2)$$

$$q = 864\alpha \frac{d}{d_n} a(2g\Delta H)^{0,5}, \quad (3)$$

де V – об'єм води, м³; q – подача гідроциклона, м³/с; α – коефіцієнт, що враховує втрату води з осадом; a – площа живого перетину живильного отвору, м²; d – діаметр зливного патрубку, см; d_n – еквівалентний діаметр живильного отвору, см; ΔH – втрата напору в гідроциклоні, м.

УФ-стерилізатор, що можна використовувати і в суднових умовах, представляє собою металевий корпус, всередині якого знаходиться бактерицидна лампа. Вона, у свою чергу, розташована в захисній кварцовій трубці. Вода омиває кварцову трубку, обробляється ультрафіолетом і знезаражується. В одній установці може бути кілька ламп.

Потрібна бактерицидна потужність джерела випромінювання установки *ультрафіолетового знезараження води*, Вт, визначається як [17]:

$$F_b = \frac{Q\alpha K_b \lg(p/p_0)}{1563,4\eta_0\eta_n}, \quad (4)$$

де Q – продуктивність апарату, м³/год; α – коефіцієнт поглинання бактерицидного випромінювання, см⁻¹; K_b – коефіцієнт опірності бактерій кишкової палички, мкб·с/см² (мкб – мікробакт, одиниця вимірювання бактерицидного опромінення); p_0 – колі-індекс



води до опромінення, од./л; p – коли-індекс води після опромінення, од./л; η_0 – коефіцієнт використання бактерицидного опромінення; η_n – коефіцієнт використання інтенсивності потоку бактерицидних променів.

Кількість ламп в установці, шт., визначається як [17]:

$$n = F_b / F_L, \quad (4)$$

де F_L – потужність однієї лампи, Вт

Витрата електроенергії на знезаражування води, (Вт·год)/м³ [17]:

$$S = \frac{Nn}{Q}, \quad (5)$$

N – споживана потужність однієї лампи, Вт; Q – продуктивність апарату, м³/ч.

Електрохімічна обробка баластної води заснована на електролізі, сутність якого полягає у використанні електричної енергії для проведення процесів окислення і відновлення. Установки з електрохімічного знезараження досить компактні, що особливо важливо в суднових умовах. Зазвичай електрохімічна обробка використовується в поєднанні з іншими способами очищення, дозволяючи успішно очистити воду від домішок різного складу і дисперсності. У багатьох випадках електрохімічні методи виключають «вторинне» забруднення води аніонними та катіонними залишками, характерними для реагентних методів [17].

Найважливіший показник процесу електрохімічного очищення води – витрата електроенергії, що потребується для досягнення необхідного ступеня очищення в одиниці об'єму. Питома витрата електроенергії, (кВт·год)/ м³, в загальному випадку визначається як [17]:

$$W = \frac{ITU_{\text{заг}}}{Q}, \quad (6)$$

де I – сила струму, А; T – тривалість електролізу, год; $U_{\text{заг}}$ – напруга на електроді, В; Q – об'єм води, що обробляється за час T , м³.

Хлорування води, обробка води хлором і його сполуками – найбільш поширений спосіб знезараження води, що засновується на здатності вільного хлору і його сполук пригноблювати ферментні системи мікробів, які каталізують окислювально-відновні процеси. Цей метод знайшов своє застосування і в системах очищення баластних вод [9].

Процес обробки води на судні не обмежується знешкодженням шляхом введення потрібної кількості активного хлору під час прийому баласту окремим насосом-дозатором. Далі настає процес зберігання обробленої води, який характеризується швидкістю розпаду хлору у воді, яку можна розрахувати за допомогою відомих рівнянь кінетики хімічних реакцій. Для видалення залишків активного хлору із води її пропускають через вугільні фільтри [9].

На базі наведених вище матеріалів, а також з використанням класичних рівнянь гідродинаміки, була розроблена математична модель та проведені розрахунки втрат опору та додаткових енерговитрат в баластних системах на різних режимах роботи для різних комплектацій систем очищення. Залежності були отримані для великого, середнього та малого вантажних суден, відповідно для супертанкера «Dar Salwa» (об'єм баласту 97779 м³, потужність одного дизель-генератору (ДГ) – 1980 кВт), лісовозу «Cosco Wuishan» (об'єм баласту 9292,4 м³, потужність одного ДГ – 500 кВт,) та порому «Passio Per Formentera» (об'єм баласту 511 м³, потужність ДГ – 500 кВт). Розрахунки проводилися для наступних варіантів комплектації: 1 – без очисного обладнання (базовий варіант для порівняння), 2 – з фільтрацією, 3 – з установкою ультрафіолетового знезараження, 4 – з електрохімічною обробкою, 5 – з фільтрацією та установкою ультрафіолетового знезараження, 6 – з фільтрацією та електрохімічною обробкою. Результати представлено на рис. 3-5.

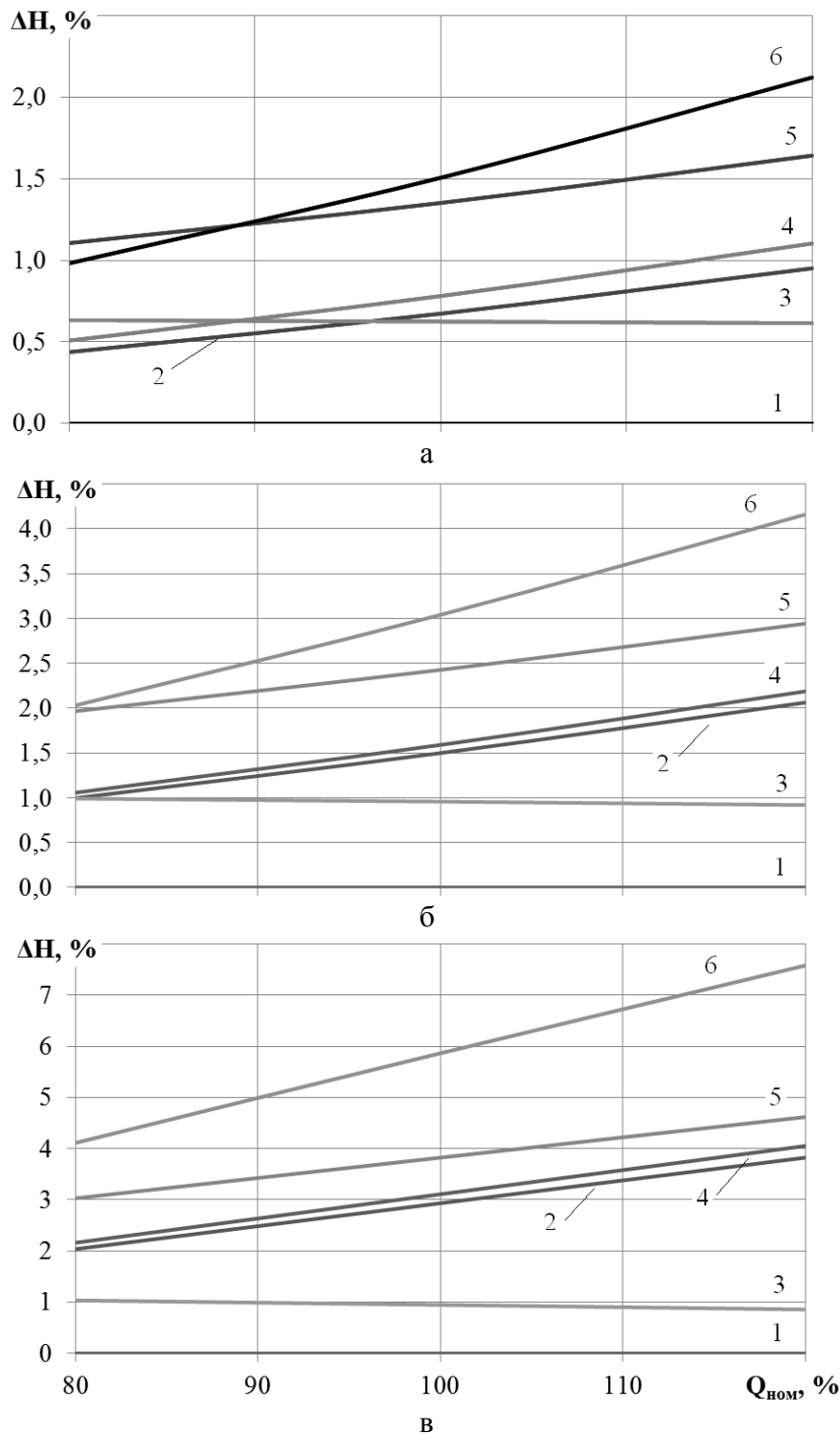


Рисунок 3 – Залежність втрат напору в системі від продуктивності та способу обробки баласту для: а – танкеру; б – лісовозу; в – порому; 1 – без очисного обладнання; 2 – з фільтрацією; 3 – з установкою ультрафіолетового знезараження; 4 – з електрохімічною обробкою; 5 – з фільтрацією та установкою ультрафіолетового знезараження; 6 – з фільтрацією та електрохімічною обробкою

При номінальній подачі в баластній системі максимальне збільшення втрат напору в системі становить 1,5 %, 3 % та 5,9 %, відповідно для великого, середнього та малого судна (рис. 3). При роботі системи з допустимим перевантаженням максимальне збільшення втрат напору в системі становить 2,1 %, 4,2 % та 7,6 %, відповідно для великого, середнього та малого судна. Максимальні втрати напору будуть при використанні в системі очищення фільтрації та електрохімічної обробки, трохи меншими вони будуть для варіанту з фільтрацією та установкою ультрафіолетового знезараження, а



найменші, порівняно з базовим варіантом, – для установки ультрафіолетового знезараження. Інші варіанти комплектації займають проміжні позиції.

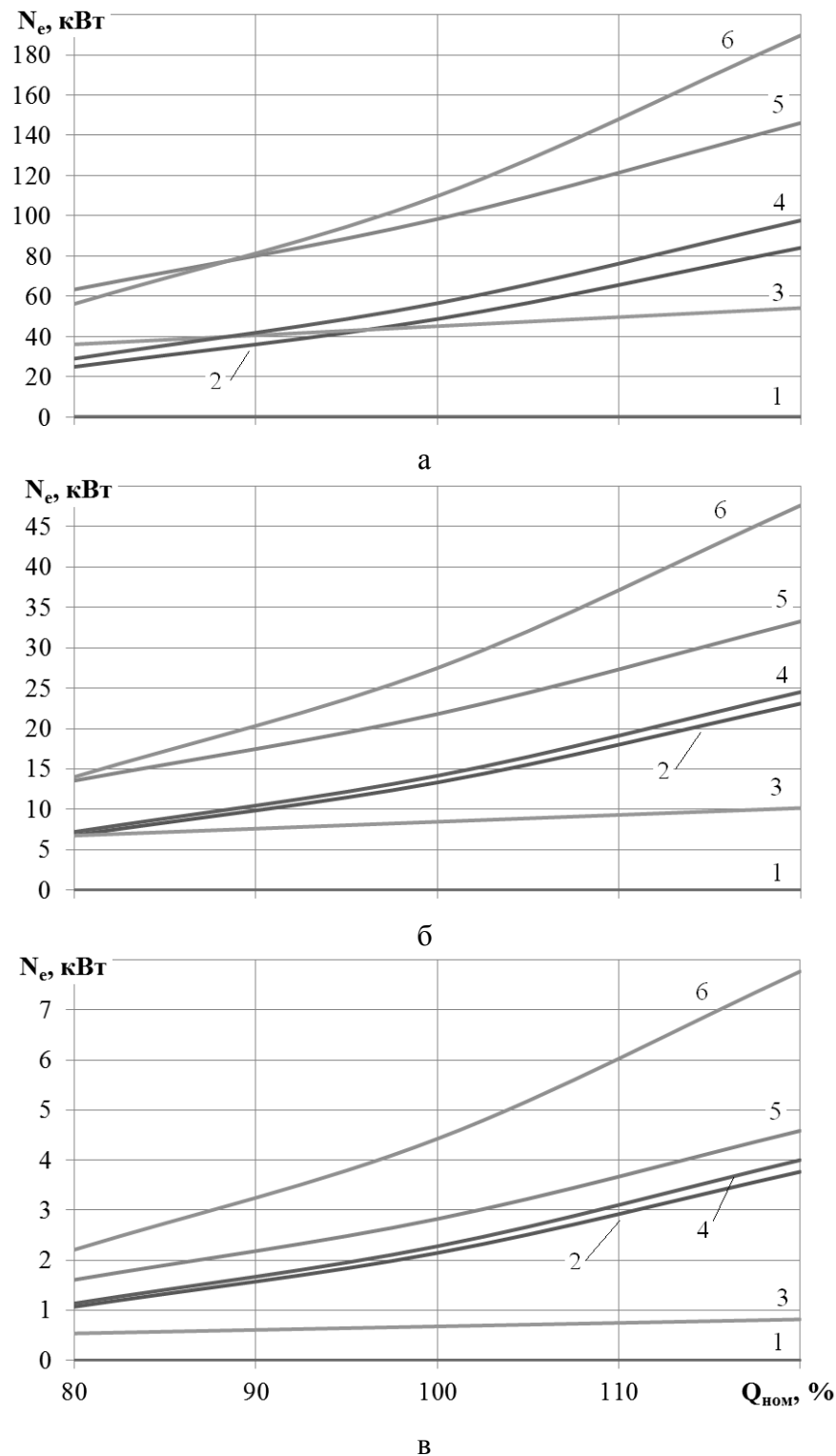


Рисунок 4 – Залежність потужності, що споживається очисним обладнанням баластної системи, від продуктивності та способу обробки баласту для: а – танкеру; б – лісовозу; в – порому; 1 – без очисного обладнання; 2 – з фільтрацією; 3 – з установкою ультрафіолетового знезараження; 4 – з електрохімічною обробкою; 5 – з фільтрацією та установкою ультрафіолетового знезараження; 6 – з фільтрацією та електрохімічною обробкою

Найбільші додаткові витрати енергії мають місце при використанні в системі очищення фільтрації та електрохімічної обробки, найменші – для установки ультрафіолетового знезараження (рис. 4). Додаткові витрати енергії складають від 2,7 %



до 9,6 % від потужності дизель-генератору в залежності від обраної схеми комплектації очисного обладнання (рис. 5).

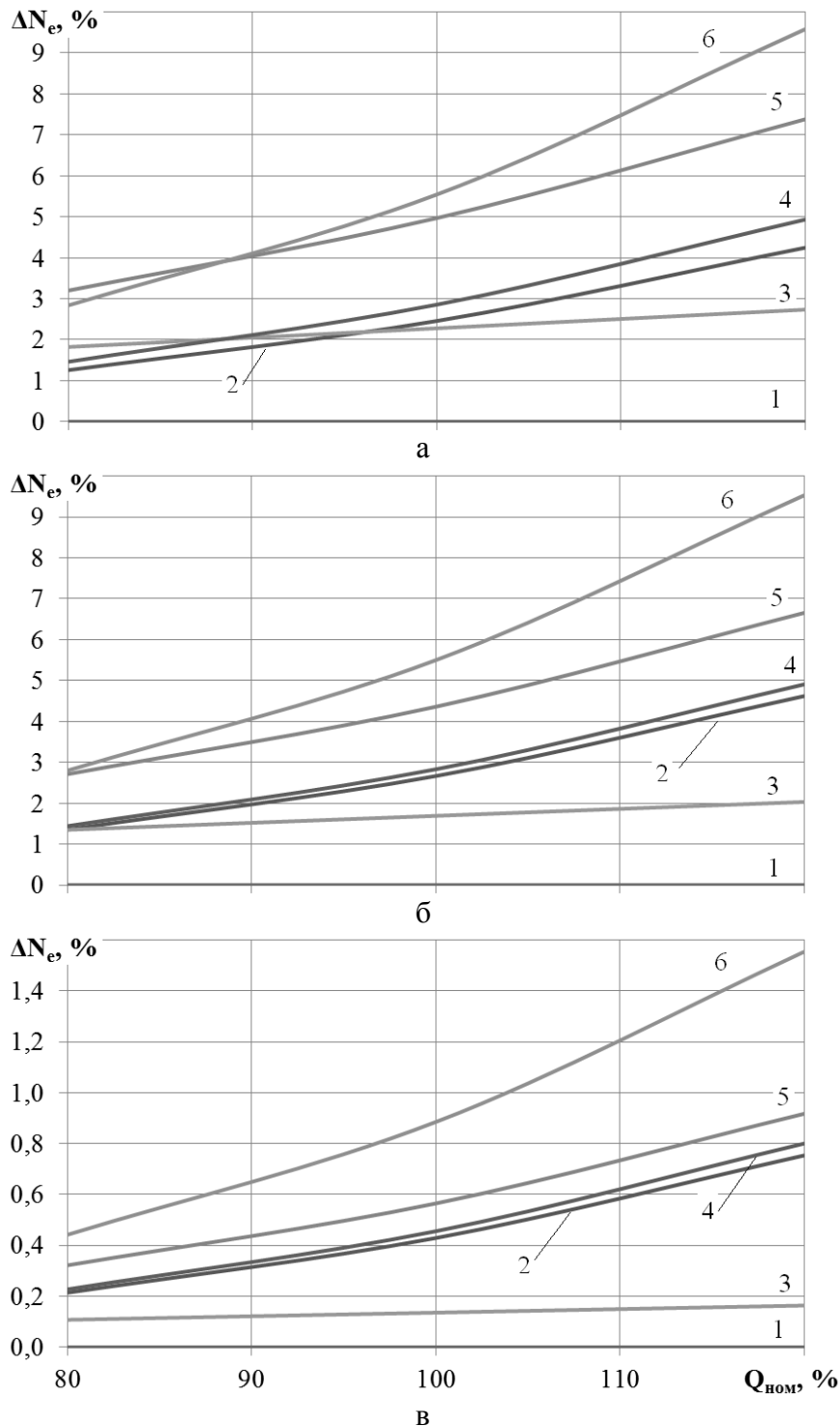


Рисунок 5 – Відношення потужності, що споживається очисним обладнанням баластної системи, до потужності ДГ: а – танкеру; б – лісовозу; в – порому; 1 – без очисного обладнання; 2 – з фільтрацією; 3 – з установкою ультрафіолетового знезараження; 4 – з електрохімічною обробкою; 5 – з фільтрацією та установкою ультрафіолетового знезараження; 6 – з фільтрацією та електрохімічною обробкою

Висновки. Розглянуті в дослідженні способи очищення баластних вод використовують проточну обробку, що не впливає на час баластних операцій за умови раціонального підбору устаткування. Енерговитрати для систем очищення баластних вод не перевищують 10 % від потужності допоміжного дизель-генератора, або 3,3 % від загальної встановленої потужності суднової електростанції. Отримані результати свідчать



про те, що при модернізації суден для відповідності новим законодавчим вимогам можна встановлювати очисне обладнання, не збільшуючи при цьому електричну потужність дизель-генераторів.

Подальші дослідження в даній тематиці будуть пов'язані з визначенням комплексних характеристик ефективності різних схем очищення баластних вод, що буде враховувати масо-габаритні, екологічні, економічні та енергетичні показники, а також з вибором раціонального складу та параметрів систем обробки баласту в залежності від типу та району плавання судна.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Александров Б. Г. Проблема переноса водных организмов судами и некоторые подходы к оценке риска новых инвазий / Б. Г. Александров // Морской экологический журнал. – 2004. – Т. 3. – № 1. – С. 5-17.
2. Горбов В. М. Суднова енергетика та Світовий океан : підручник / В. М. Горбов, І. О. Ратушняк, С. І. Трушляков, О. К. Чередниченко. – Миколаїв : НУК, 2007. – 596 с.
3. Hallegraeff G. M. Transport of toxic dinoflagellates via ships' ballast water: bioeconomic risk assessment and efficacy of possible ballast water management strategies / G. M. Hallegraeff // Marine Ecology Progress Series. – 1998. – Vol. 168. – P. 297-309.
4. Ballast Water Management [Electronic resource]. – Mode of access: <http://www.imo.org/OurWork/Environment/BallastWaterManagement/Pages/Default.aspx>.
5. Ballast water treatment technologies and current system availability [Electronic resource] : Part of Lloyd's Register's Understanding Ballast Water Management series. – London, 2012. – Mode of access: http://www.lr.org/Images/BWT2012v2b_tcm155-242898.pdf.
6. Guide for ballast water treatment [Electronic resource]. – Houston : American Bureau of Shipping, 2011. – Mode of access: http://www.eagle.org/eagleExternalPortalWEB/ShowProperty/BEA%20Repository/Rules&Guides/Current/187_BWT/Guide.
7. Emerging Ballast Water Management Systems [Electronic resource]. – Malmö, Sweden: IMO-WMU Research and Development Forum, 26-29 January 2010. – Mode of access: <http://globallast.imo.org/EmergingBallastWater.pdf>.
8. Ballast Water Treatment Advisory [Electronic resource]. – Houston: American Bureau of Shipping, 2011. – Mode of access: <http://www.eagle.org/eagleExternalPortalWEB/ShowProperty/BEA%20Repository/References/ABS%20Advisories/BWTreatmentAdv>.
9. Сустретова Н. В. Обеспечение экологической безопасности балластных вод на судах смешанного «река-море» плавания: диссертация кандидата технических наук: 03.02.08 / Н. В. Сустретова. – Нижний Новгород, 2011. – 140 с.
10. Felts A. Great Lakes Aquatic Invasive Species and Their Impacts on Milwaukee [Electronic resource] / A. Felts and others. – USA, Wisconsin : University of Wisconsin-Madison, 2010. – Mode of access: <http://www.lafollette.wisc.edu/publications/workshops/2010/invasive.pdf>.
11. Flower J. On continuous-flow techniques for the purging of contaminated water in ballast water tanks / J. Flower // Journal of Marine Engineering and Technology. – 2002. – № A1. – P. 37-47.
12. Yongxin Song Corrosion of marine carbon steel by electrochemically treated ballast water [Text] / Yongxin Song, Kun Dang, Huafang Chi, Delin Guan // Journal of Marine Engineering and Technology. – 2009. – № A13. – P. 49-55.
13. Чужеродные виды: руководящие принципы для предотвращения, интродукции, уменьшения воздействия, ЮНЕП/КБР/ВОНТТК/5/5, Монреаль, февраль 2000 г.
14. Марченко М. А. Статистическое моделирование пространственно неоднородной коагуляции с учетом диффузионного переноса частиц / М. А. Марченко // Сибирский журнал вычислительной математики. – 2005. – Т. 8. – № 3. – С. 245-258.



15. Дытнерский Ю. И. Процессы и аппараты химической технологии: в 2 ч. Ч. 1. Теоретические основы процессов химической технологии. Гидромеханические и тепловые процессы и аппараты / Ю. И. Дытнерский. – М. : Химия, 1995. – 400 с.
16. Поваров А. И. Гидроциклоны на обогатительных фабриках / А. И. Поваров. – М. : Недра, 1978. – 232 с.
17. Водоподготовка : справочник / под ред. С. Е. Беликова. – М. : Аква-Терм, 2007. – 240 с.

Горбов В.М., Митенкова В.С., Тимофеева А.С. СРАВНИТЕЛЬНАЯ ОЦЕНКА ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ СПОСОБОВ ОБРАБОТКИ БАЛЛАСТНЫХ ВОД

Выполнена оценка дополнительных расходов энергии для различных вариантов схемных решений обработки балластных вод на борту судна. Проведен анализ энергопотребления и продолжительности разных механических, физических и химических способов очистки забортной воды. Получены зависимости потерь напора и дополнительной электрической мощности в балластной системе от подачи для разных способов обработки забортной воды на судне.

Ключевые слова: балластные воды, энергетическая эффективность, фильтрация, ультрафиолетовое обеззараживание воды, электрохимическая обработка, хлорирование.

Gorbov V.M., Mitienkova V.S., Timofeeva A.S. THE ENERGY EFFICIENCY COMPARATIVE EVALUATION OF BALLAST WATER TREATMENT DIRECTIONS

The additory power consumption estimation for various variants of on-board ballast waters treatment schematics was placed. The analysis of power consumption and various mechanical, physical and chemical directions of on-board seawater treatment was carried out. The dependences of head losses and additory electrical power on the ballast system from supply for various on-board seawater treatment methods were obtained.

Keywords: ballast waters, energy efficiency, filtration, water ultraviolet decontaminating, electrochemical treatment, chloration.