

ОСОБЛИВОСТІ ОПТИМІЗАЦІЇ ТЕХНОЛОГІЇ ОБРОБКИ БАЛАСТНИХ ВОД УЛЬТРАФІОЛЕТОВИМ ВИПРОМІНЮВАННЯМ

Литвиненко В. В., д.т.н., старший науковий співробітник, директор Інституту електрофізики і радіаційних технологій НАН України, м. Харків, Україна, e-mail: vlytyvnenko@ukr.net, ORCID: 0000-0003-4850-2555;

Шаляпін С. М., академік інженерної академії України, директор ТОВ «Харківська інженерна компанія», м. Харків, Україна, e-mail: info@waterlight.pro, ORCID: 0009-0000-6800-8832.

Розглянуто проблеми розробки та впровадження технології знезараження баластних вод на основі використання джерел ультрафіолетового випромінювання та супутніх розвинених окислювальних процесів. Проаналізовано основні параметри води, які визначають вимоги до сумарної інтенсивності джерел випромінювання. Запропоновано схему формування знезаражувального ефекту, яка враховує роль чинників випромінювання, параметрів води та активності реагентів. Проаналізовано біофізичні процеси, що відбуваються при дії ультрафіолетового випромінювання широкого спектра на мікроорганізми. Розглянуто організаційно-технічні заходи, що повинні бути враховані при впровадженні даних технологій на судах. На прикладі пілотної установки наведено перелік компетенцій, якими має опанувати персонал судна для дотримання норм експлуатації установки. Наведено техніко-економічні показники установки для знезараження баластних вод, які мають покладатись в основу при проектуванні установки для замовника. Запропоновано конструкцію установки для знезараження баластної води ультрафіолетовим випромінюванням. Описано способи контролю за утворенням осаду на поверхні джерел ультрафіолетового випромінювання та запропоновано спосіб їх очищення від осаду. Розроблено схему очищення баластної води при закачуванні в цистерну та при дебаластуванні. Передбачена можливість модульної компоновки системи знезараження з метою оптимального розташування обладнання у приміщенні судна. Описано систему автоматичного управління технологією очищення баластної води. Вказано напрямки удосконалення установок для більш повного виконання функцій знешкодження мікроорганізмів, що переносяться з баластними водами.

Ключові слова: знезараження баластних вод; ультрафіолетове випромінювання; фільтрація; регламент обробки.

DOI: 10.33815/2313-4763.2024.2.29.070-082

Вступ. Одним з сучасних викликів для безпеки людства є слабкопередбачувана динаміка розвитку світу мікроорганізмів, що постійно підсилюється завдяки мобільності людських та товарних потоків, суперечностях у культурі харчового споживання, все більшій інтегрованості світової спільноти, а також створенням новітніх штучних біологічно поживних середовищ. У зв'язку з цим для широкої номенклатури товарної продукції та пасажиропотоків застосовують запобіжні знезаражуючі заходи з метою недопущення поширення штамів мікроорганізмів та вірусів від одного регіону до іншого. Одним з наочних та узагальнених проявів цієї проблеми є епідемія, зумовлена поширенням вірусу COVID-19.

Для морських транспортних суден забір водного баласту є способом збереження стійкості. Разом із баластною водою в суднові танки потрапляють морські організми, ікра, личинки, рослини, а також збудники небезпечних хвороб. Таким чином, вказана проблема зацентрована в необхідності розробки ефективних засобів очищення та знезараження баластних вод, як середовища неконтрольовані скиди якого здійснюють інтенсивне перенесення мікроорганізмів у невласиві для них водні середовища. Під час скидання баласту в інших географічних районах морські організми і рослини, не зустрічаючи, найчастіше, природних ворогів, починають активно розмножуватися. Негативний характер наслідків цього процесу має різноманіття проявів та механізмів реалізації. Серед яких порушення екологічної рівноваги в ланцюжку «хижак-жертва», утворення біологічних обростань на гідротехнічних спорудах, нанесення шкоди морським господарствам, загроза здоров'ю людей.

На рівні міжнародного морського права це відображено у Міжнародній конвенції про контроль суднового водяного баласту й осадів та поводження з ними від 2004 року, що покликані запобігти руйнуванню природних механізмів підтримання біорізноманіття та функціонування процесів збалансованого саморегулювання у квазіавтономних водних екосистемах. Оснащення вітчизняного морського транспорту відповідним спеціалізованим обладнанням є запорукою інтеграції України у світовий простір надання транспортних послуг та долучення до актуальних стандартів. З огляду на комплексність проблеми її вирішення полягає в створенні принципів проектування обладнання, його сертифікації та підготовці фахівців, здатних його експлуатувати.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. На теперішній час окреслився певний перелік технічних засобів досягнення знезаражуючого ефекту. Їх аналіз наведено в низці робіт. Так у роботі [1] проаналізована установка, що використовується компанією Offshore Heavy Transport, спроектована та вироблена SunRui Marine Environment Engineering Co., Ltd. В основі роботи установки є процеси фільтрації та обробки окислювачем – гіпохлоритом натрію. У роботі також робиться акцент на необхідності підготовки суднових механіків. Зазначимо, що гіпохлорит натрію є небезпечною речовиною, отже робота з ним вимагає додаткових заходів безпеки. У системній роботі [2] представлена ретроспектива осмислення проблематики порушення екологічного балансу внаслідок скиду баластних вод та еволюція міжнародного законодавства, покликаною регулювати ці процеси та запобігати їх негативним наслідкам. Авторами проаналізовані найбільш поширені методи обробки води і відзначають перспективність методу обробки УФ-випромінюванням за показниками безпечності для персоналу, відсутності побічних ефектів, ефективністю знезараження. Істотним висновком у роботі [2] є те, що для обробки баластних вод застосовуються ті технологічні процеси, що мають традицію використання в наземних умовах. І, відповідно, для них властиві ті самі вади, що і для ділянок водопідготовки апробованих наземних технологій. Разом з тим слід відзначити, що в умовах розміщення на морському транспорті неминуче стикаємось з проблемою обмеженості простору для встановлення обладнання, обмеженості енергетичного ресурсу, умовами дотримання правил техніки безпеки, особливо що стосується роботи з отруйними речовинами (хлор, гіпохлорит натрію, озон), а також роботи з високовольтним обладнанням (озонатори, джерела імпульсів напруги). У роботі [3] надано узагальнений аналіз методів знезараження баластної води, серед яких метод УФ-обробки відрізняють такі переваги, як найвища знезаражувальна ефективність, можливість миттєвого скиду після обробки, відсутність хімічних змін у воді при середніх (порівняно з іншими показниками значення вартості). До ускладнюючих чинників відноситься необхідність попередньої обробки (як правило механічної фільтрації), також до технічних особливостей експлуатації таких установок належить необхідність очищення поверхонь джерел випромінювання, про що зазначається в роботі [4]. Таким чином, є цілком обґрунтованим більш ретельно підійти до урахування потенційних вад методу обробки УФ-променями та віднайти резерви підвищення його ефективності.

Постановка задачі. Метою проведених досліджень є розробка ефективного методу дезінфекції баластних вод від патогенних мікроорганізмів, заснованого на застосуванні спільного впливу механічної фільтрації нетоксичних окисників і інтенсивного ультрафіолетового опромінення. Підставою для очікування на одержання позитивних результатів є розроблена в роботі [5] концепція синергетичної дії факторів опромінення та факторів середовища, якому відбувається опромінення на радіаційно-стимульований вихід. Мультиплікативний ефект від одночасного впливу квантів ультрафіолетового випромінювання та окислювальної дії перекису водню на інактивацію мікроорганізмів полягає в дії кількох механізмів. Так, поглинаючи квант низькоенергетичного випромінювання молекула води підвищує власну реакційну здатність. Якщо реакція деструкції відбувається за ланцюжковим механізмом, саме випромінювання може стати ініціатором зародження первинних радикалів. Іншою складовою є необхідність каталітичного підсилення процесу окислення та подальшої деструкції. Слід зазначити, що

застосування джерел ультрафіолетового випромінювання з широким спектром від 200 до 300 нм, має сприятливо відображатись на перебігу необхідних нам процесів, оскільки, не знаючи точно спектрів поглинання молекул, ми забезпечуємо варіабельність впливу за рахунок широкополосності впливу. Наявність молекулярного кисню, особливо озону, спричиняє утворення синглетно-триплетних збуджених станів, що також може сприяти інтенсифікації процесів деструкції клітин мікроорганізмів.

Методи дослідження. Побудова моделі взаємодії УФ-променів з мікроорганізмами, що містяться у воді, процесом, який вимагає врахування багатьох факторів. І тут доречно повернутися до загального визначення електрофізичних променевих технологій та до тих підходів, які були вироблені авторами під час створення електрофізичних комплексів [6]. Пропонована концептуальна модель фізико-хімічних та біологічних процесів, що відбуваються при знезараженні води УФ-променями, апробована при розробці низки інших електрофізичних променевих технологій [7] та адаптована авторами з урахуванням існуючого досвіду з проєктування, виготовлення та впровадження УФ-установок. Модель є по суті структурною оболонкою для автоматизації експерименту та створення експертної системи автоматизованого проєктування. Зважаючи на багатофакторність процесу виникає завдання урахування взаємоузгодженої дії всіх чинників та оцінити їх внесок у формування знезаражуючого ефекту і на підставі цього сформулювати оптимальні параметри технологічного процесу. Досягнення знезаражуючого ефекту в технології, що використовує УФ випромінювання та додаткові впливи на параметри води (фільтрація, реагентна обробка окислювачем) є процесом, що залежить від багатьох чинників. Визначальним є чинник УФ-випромінювання F_{UV} (спектр випромінювання, потужність, доза), який за умови забезпечення по всій камері обробки мінімально необхідної дози, забезпечує інактивацію мікроорганізмів. Разом з тим на ефективність знезараження здатен впливати спектр випромінювання. Максимальний бактерицидний ефект властивий довжинам хвиль 260–265 нм, які найбільш інтенсивно поглинаються нуклеїновими кислотами [8, 9]. Для окремих мікроорганізмів цей максимум знаходиться в діапазоні 280 нм. Слід також брати до уваги, що поглинання кванта з довжиною хвилі 310–340 нм може призвести до ефекту репарації [8], навіть якщо попередньо отримана доза була номінально достатньою для знезараження і може підвищитись. У таких граничних випадках можуть визначальну роль відігравати чинники параметрів води (температура, рН індекс). У свою чергу під впливом УФ-променів у воді утворюються радикали ОН, молекули О₃, які спричиняють власну бактерицидну дію і їх можна характеризувати як чинники сукупного впливу. Відтак необхідно детально розглянути всі складові розрахунку, проєктування та виготовлення установок.

Методика розрахунку розподілу знезаражуючої дози.

Умовою інактивації бактеріальної мікрофлори і забезпечення обробки рідини значенням дози не менше певного значення. За умови використання декількох джерел УФ-випромінювання доза буде розподілятися нерівномірно, але при проєктуванні необхідно забезпечувати мінімально встановлене опромінення в будь-якій ділянці камери обробки. Серед чинників, що впливають на нерівномірність розподілу дози є те, що густина потужності випромінювання по мірі відділення від джерела циліндричної форми змінюється по закону Ламберта-Бугера

$$I(r) = \frac{P_0}{2\pi rh} e^{-\alpha r}, \quad (1)$$

де P_0 потужності випромінювання джерела Вт; r – відстань від вісі джерела, м, h – довжина джерела випромінювання, м; α – коефіцієнт поглинання випромінювання водою м⁻¹. Для прісної води, згідно даних наведених у [10, 11], α є величиною, яка комплексним чином залежить від багатьох чинників, і узагальнено визначається виразом

$$\alpha = F(K, T, C), \quad (2)$$

де K – кольоровість води, град; T – безрозмірний параметр мутності води, який у свою чергу залежить від кольоровості; C – концентрація елементів (заліза, хрому, марганцю) мг/л. Хоча баластні води стосуються морської води, остаточно нехтувати виразом для прісної води не варто, оскільки в прибережних зонах можна очікувати за певних випадків і суміші прісної води з морською. Разом з тим цей вираз спонукає нас ретельніше розглянути чинники, що впливають на оптичні характеристики морської води, і фактично визначають величину α . У роботі [12] зазначається, що значення відносної прозорості води коливається від 6 одиниць (Біле море) до 66,5 одиниць (Атлантичний океан, Саргасове море), середній показник становить приблизно 40 одиниць. Колір води залежить від вмісту в ній завислих частинок, також від погодних умов. Отже, здійснюючи розрахунок камери УФ-знезараження необхідно брати до уваги відмінність значень коефіцієнта оптичного поглинання, а відповідно, розрахунок треба здійснювати за консервативним сценарієм.

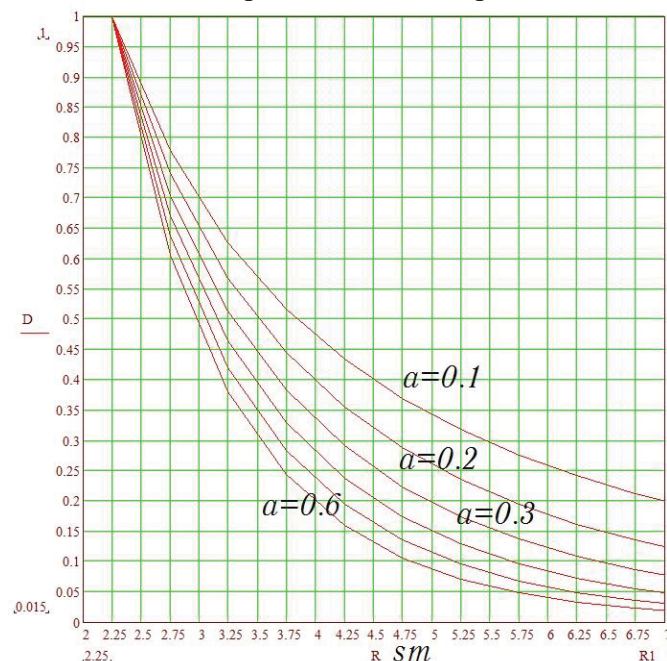


Рисунок 1 – Залежність значення інтенсивності випромінювання для циліндричного джерела од відстані від поверхні для різних значень прозорості води α (від 0,1 до 0,6)

На рис. 1 наведено залежність відносного значення інтенсивності випромінювання для циліндричного джерела од відстані від поверхні для різних значень α . Як бачимо, у випадку зміни значень α , потік води може не отримати задане значення дози. З метою уникнення такої ситуації установка має проєктуватись за консервативним сценарієм, тобто для найбільшого очікуваного значення α . Іншим варіантом досягнення потрібного значення поверхневої дози $D(r)$ [Дж/м²] згідно формули (3) є можливість регулювання швидкості потоку води через камеру обробки, а отже часу набору дози. Поверхнева доза $D(r)$, на відстані r визначається виразом

$$D(r) = I(r) \cdot t, \quad (3)$$

де t – час перебування елементарного об'єму води в точці r .

Ще одним підходом може бути збільшення дози реагенту та/або застосування додаткової електрофізичної обробки високовольтними імпульсами [13].

Адаптація устаткування до чинних міжнародних вимог.

Для запобігання зараженню та порушення екологічної рівноваги було ухвалено Міжнародну конвенцію з очищення баластних вод морських суден (ІМО), відповідно до якої посилено стандарт D-2, який визначає максимальну кількість життєздатних організмів, що містяться в баластних водах.

Відповідно до вимог Міжнародної морської конвенції (ІМО) вся вода, яка використовується морськими і річковими судами для контролю диференту, крену, осаду та інших цілей, повинна бути очищена від мікроорганізмів, водоростей та інших органічних речовин.

Затверджений ІМО стандарт не тільки жорстко регламентує кількість небезпечних бактерій і вірусів, які перебувають у баластних водах, що скидаються, а й обмежує вміст у них фітопланктону, що пред'являє підвищені вимоги до водоочисного устаткування і методів контролю якості очищення баластних вод.

Так відповідно до вимог ІМО в оброблених баластних водах кількість:

- життєздатних організмів розміром понад 50 мкм не має перевищувати 10 шт./м³;
- токсикогенних вібріонів холери (O1 і O139) має бути менше ніж 1 КУО/100 мл або менше ніж 1 КУО/г (сирої ваги) зразків зоопланктону;
- бактерій групи кишкової палички – менше 250 КУО/100 мл;
- кишкових ентерококів – менше 100 КУО/100 мл.

Для забезпечення вимог ІМО більшість морських та річкових суден для вирішення цієї проблеми вимушені використовувати дуже коштовні закордонні розробки, у той час, як на теренах нашої країни вже кілька десятиріч ведуться розробки не менш ефективних засобів боротьби з присутніми у питних, стічних, морських та технічних водах мікроорганізмами.

Технологічна реалізація пілотної установки.

Для дотримання вищевказаних вимог було спроектовано та виготовлено систему електрофізичного очищення та знезараження морських та річкових баластних вод, яка покликана запобігти руйнуванню природних механізмів підтримання біорізноманіття та функціонування процесів збалансованого саморегулювання в водних екосистемах. Технологічний процес ґрунтується на використанні сучасних розробок у галузі електрофізичних променевих технологій, методів очищення та знезараження стічних та сильно мінералізованих вод. Метод засновано на комплексному використанні таких чинників як: напірна фільтрація, ультрафіолетове опромінення інтенсивне окиснення органічних речовин перекисом водню, атомарним киснем та гідроксильними радикалами тощо.

При розробці технології найбільша увага була сконцентрована на ефективності очищення та енергоємності цього процесу. Були ретельно вивчені сучасні технології очищення, які засновані на використанні УФ-опромінення та хімічних методів знезараження. Вивчалися ефективність цих технологій, їх вплив на навколишнє середовище, складність обслуговування технологічного обладнання та інші фактори.

Так було виявлено, що при використанні технології УФ-опромінення для досягнення необхідного ефекту знезараження необхідно використовувати достатньо велику кількість енергії УФ-опромінення. Так для досягнення гарантованого ефекту знешкодження бактерій та більшої частки мікроорганізмів величина знезаражуючої дози УФ-опромінення (кількість бактерицидної енергії) повинна становити 200–400 мДж/см². При цьому навіть така велика кількість бактерицидної енергії не забезпечує гарантованого знищення моллюсків, їх личинок та інших мікроорганізмів. Для порівняння можна привести, що для знешкодження бактерій групи кишкової палички, які присутні у міських стічних водах, величина знезаражуючої дози УФ-опромінення повинна становити 40 мДж/см², а при наявності паразитів – не менше 65 мДж/см² [14].

Крім того, необхідно брати до уваги чутливість мікроорганізмів до спектра УФ-опромінення. Так, більшість бактерій, вірусів і найпростіших мікроорганізмів, як вже зазначалось, найбільш чутливі до УФ-опромінення з довжиною хвилі 260–265 нм, які генеруються УФ-лампами низького тиску. Однак такі мікроорганізми, як личинки мушель, більш чутливі до УФ-випромінювання з довжиною хвилі 280 ... 310 нм, яке генерується

УФ-лампами середнього тиску. Крім того, технологію УФ-зnezараження досить проблематично використовувати для зnezараження осаду.

При виборі типу зnezаражуючих УФ установок окрім ефективності зnezараження варто звертати увагу на такий параметр, як їх електрична потужність. Так при однаковій продуктивності й ефективності зnezараження (за більшою часткою мікроорганізмів) УФ установка з лампами низького тиску споживає електрики у 2–3 рази менше ніж її аналог з УФ-лампами середнього тиску. Питомі витрати електрики, яка використовується для зnezараження 1000 м³ баластної води, становлять 125–150 кВт·годин – для УФ установок з лампами низького тиску, та 250–450 кВт·годин для УФ установок з лампами середнього тиску [15].

Також уважно була вивчена можливість використання традиційних методів очищення і зnezараження баластних вод за допомогою таких хімічних реагентів як хлор, гіпохлорит натрію або кальцію, діоксид хлору та інші [1–4]. Було встановлено, що при використанні таких хімічних речовин можна досягнути значної ефективності очищення баластних вод та осаду, але для забезпечення необхідного ступеню зnezараження необхідно використовувати підвищені дози реагентів. А це веде з одного боку до збільшення вартості процесу зnezараження, а з другого – до забруднення акваторії токсичними хлорорганічними продуктами, які негативно впливають на місцеву флору і фауну.

Дуже перспективним для очищення та зnezараження баластних вод та їх осаду є використання екологічно чистого озону [10]. Озон отримують з глибоко очищеного та осушеного повітря за допомогою спеціальних високовольтних установок, які можуть встановлюватися у машинному відділенні. Але у цьому разі необхідно брати до уваги складність технологічного обладнання та високі витрати електричної енергії, яка необхідна для утворення озону.

У результаті ретельного вивчення існуючих методів очищення та зnezараження баластних вод та їх осаду, керуючись великим досвідом у розробці сучасних зnezаражуючих технологій, була запропонована технологічна схема очищення, яка заснована на використанні комплексу електрофізичних і окиснювальних факторів. Згідно технологічної схеми, яка пропонується вашій увазі, очищення води починається з її фільтрації, що забезпечує механічне видалення макрооб'єктів і підвищує ефективність наступного етапу їх руйнування в результаті процесу окиснення. Процес окиснення забезпечує часткове руйнування клітин мікроорганізмів та підвищує ефективність наступного етапу – УФ-опромінення. У результаті такої комбінованої обробки досягається висока ефективність зnezараження мікроорганізмів і мікрофлори.

Процес очищення баластних вод починається на стадії їх забору. Спочатку забортна вода поступає на промивний автоматичний фільтр, де відбувається видалення з води мікроорганізмів, які завбільшки за 50 мкм. Далі вода подається до блоку електрофізичної обробки, де вона спочатку обробляється високовольтними електричними імпульсами, а потім до блоку окиснення, де відбувається її контакт з перекисом водню (H₂O₂), атомарним киснем (O), гідроксильними радикалами (OH, OH₂). Після контакту з окиснювачем вода потрапляє до УФ установки, де в результаті фотохімічних процесів здійснюється зnezараження мікроорганізмів. Зnezаражена вода направляється до баластних баків. Враховуючи те, що в результаті фотохімічних процесів у баластній воді утворюються активні радикали (OH), процес зnezараження деякий час продовжується у баластних баках, що підвищує ефективність процесу. Корозійна активність активних радикалів, які потрапляють до баластних резервуарів невелика, бо вони достатньо швидко рекомбінують. Крім того, наявність у зnezараженій воді невеликої кількості активних радикал-іонів забезпечує створення на незахищених металевих частинах трубопроводів та ємностей оксидну плівку, яка підвищує стійкість металевих конструкцій до корозії.

З погляду зниження витрат електрики, яка витрачається для зnezараження баластної води дуже доцільним є проведення зnezараження у два етапи: при закачуванні води у баластні цистерни у точці відправки судна і при їх спорожненні у точці прибуття. Такий

метод знезараження дозволяє знизити потужність СУБВ за рахунок того, що сумарна доза знезаражуючого УФ-опромінення досягається за два проходи води через камеру знезараження. На першому етапі здійснюється обробка при закачуванні води в баластну цистерну рис. 2.



Рисунок 2 – Схема очищення баластної води при її закачуванні до баластних цистерн

При скиданні води обробка здійснюється у зворотному порядку рис. 3.

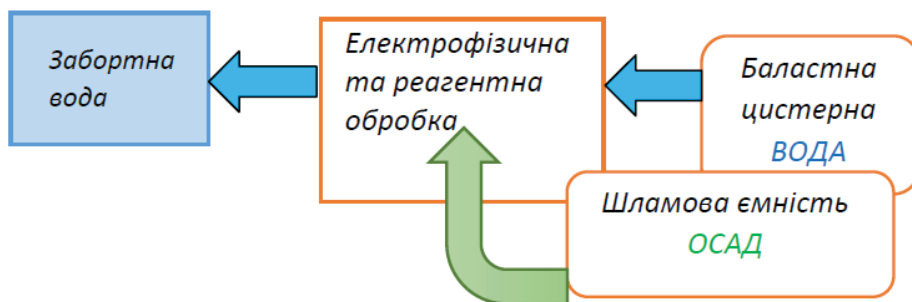


Рисунок 3 – Очищення води та осаду при дебаластуванні

В основу технологічного процесу очищення води покладено принцип підвищення ефективності знезараження води в результаті спільної дії бактерицидного УФ-випромінювання і невеликих кількостей перекису водню, які вводять у воду, яка знезаражується. При контакті з окиснювачем (атомарний кисень, перекис водню, активні гідроксил-радикали) відбувається пошкодження клітинної структури мікроорганізмів та рослин та здійснюється денатуралізація білків, ліпідів, нуклеїнових кислот, які входять до їх клітинної структури [8, 9], що призводить до ослаблення біологічної стійкості цих рослин та мікроорганізмів та суттєво підвищує ефективність наступної фази знешкодження – а саме УФ-опромінення. Під впливом потоку інтенсивного УФ-випромінювання відбувається практично миттєва загибель бактерій і вірусів, що перебувають у воді. Крім того, високоактивна редокс-система OH^* , яка утворюється при контакті УФ-випромінювання з окиснювачем, ефективно руйнує стійкі до дії УФ-випромінювання мікроорганізми, що перебувають у воді. У результаті чого забезпечується висока ефективність знищення мікроорганізмів. Така технологія отримала назву технології активного окислення або АОП (Advanced Oxidation Processes) і застосовується в новому поколінні установок знезараження та очищення води [16, 17].

Для зменшення потужності сумарна доза знезаражуючого УФ-опромінення досягається за два проходи води через камеру знезараження рис. 4. Для реалізації цієї технології розроблена система управління баластними водами (СУБВ), яка здатна забезпечити ефективне очищення та знезараження баластних вод та осаду відповідно до вимог ІМО. Основний процес обробки – знищення мікроорганізмів відбувається всередині фотохімічного реактора, який забезпечує високий ступінь знешкодження мікроорганізмів різного типу.

Попередня електрофізична обробка високовольтними імпульсами та введення в камеру знезараження невеликих кількостей ініціатору – перекису водню забезпечує посилення знезаражувального ефекту, чинить летальну дію на фітопланктон, який перебуває

у воді, та призводить до зниження величини знезаражувальної дози УФ-випромінювання, що, зі свого боку, зменшує енергоємність процесу знезараження.

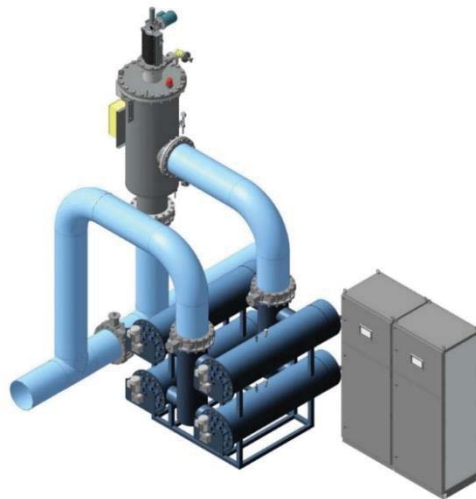


Рисунок 4 – Система управління баластними водами СУБВ ВОДОГРАЙ В500.03 МБФ. Зовнішній вигляд

Система управління баластними водами ВОДОГРАЙ складається з автоматичного фільтра очищення морської води, модуля електрофізичної обробки та модуля дозування ініціатора фотохімічних реакцій. Принцип дії СУБВ ВОДОГРАЙ ґрунтується на комплексній дії окиснювачів та УФ-опромінення на життєздатність мікроорганізмів (бактерій та вірусів), планктону і мікрофлори, які перебувають у баластній воді.

Для збільшення ефективності знешкодження мікроорганізмів та зменшення енерговитрат системи знезараження баластних вод проводиться у два етапи:

- під час закачування забортної води в баластні цистерни;
- під час скидання баластних вод в акваторію.

З метою зменшення витрат електрики, яка витрачається для знищення мікроорганізмів та мікрофлори, модуль УФ знезараження води, який входить до складу СУБВ ВОДОГРАЙ, оснащений УФ-лампами низького тиску, які випромінюють квазімоноенергетичний спектр в області максимальної бактерицидної ефективності (250–265 нм). Застосування УФ-ламп низького тиску з використанням окиснювача, здатне забезпечити високу ефективність знешкодження всіх типів мікроорганізмів.

Для забезпечення високої ефективності знешкодження мікроорганізмів УФ модуль оснащується автоматичною системою очищення захисних кварцових трубок, у яких розміщуються УФ-лампи.



Рисунок 5 – Модуль УФ знезараження СУБВ ВОДОГРАЙ В500.03 МБФ

СУБВ ВОДОГРАЙ має модульну конструкцію. Тобто СУБВ ВОДОГРАЙ складається з окремих модулів, що дозволяє розміщувати СУБВ на діючих суднах з урахуванням обмеженості простору та плану приміщення. Вертикальне компонування окремих модулів дає змогу легко нарощувати потужність СУБВ. Розрахунок кількості джерел випромінювання в модулі здійснюється за консервативним підходом, щодо оптичної прозорості води та очікуваного кола індексу. Вирази для розрахунку кількості джерел та енергетичних витрат на їх експлуатацію наведено в роботі [18]. Згідно даних роботи [19] витрати на здійснення фільтрації становлять від 0,4 кВт х год/м³ для частинок розміром 0,1–0,5 мкм до 5 кВт х год/м³ для 0,005–0,05 мкм.

Основні техніко-економічні параметри модуля наведені в таблиці 1.

Таблиця 1 – Основні технічні параметри СУБВ ВОДОГРАЙ В500.03 МБФ

№	Параметр	Значення	Од. вим.
1	Номінальна продуктивність	500	м ³ /годину
2	Розрахункове значення дози УФ-опромінювання при коефіцієнті прозорості морської води $T_{10} = 35\%$	150	мДж/м ²
3	Напруга живлення	АС 400 В, 50 Гц	В
4	Потужність	60	кВт
5	Тип УФ-ламп	низького тиску	
6	Ресурс УФ-ламп	16000	годин
7	Розмір сітки фільтра механічного очищення баластної води	50	мкм
8	Питомі витрати ініціатора фотохімічних реакцій (hydrogen peroxide H ₂ O ₂)	2,5	кг/1000 м ³
9	Вартість ініціатора (концентрація перекису водню 35%)	2	EUR/кг
10	Вартість УФ-лампи	180	EUR/шт.
11	Питомі витрати електрики	100	кВт·годин/1000 м ³

Обслуговування установки передбачає наявність певних навичок у фахівців зі служби судового механіка, які набуваються протягом триденного тренінгу. Для цього на базі інструкції з експлуатації розроблено базовий навчальний курс. Установка спроектована таким чином, щоб витрати часу на її обслуговування й експлуатацію були мінімальними.

Установка оснащується шафою управління, в якій розміщуються системи управління УФ-лампами і механізмами очищення захисних кварцових колб, а також система автоматичного контролю й управління знезараженням баластних вод (АСУ). АСУ забезпечує управління і контроль основних параметрів установки відповідно до вимог ІМО. АСУ оснащується пристроями автоматичного моніторингу та регулювання обсягів та інтенсивності обробки баластних вод на базі мікропроцесорного контролера.

З метою проведення офіційних перевірок і технічного обслуговування АСУ забезпечує генерування звітів про параметри автоматичного моніторингу роботи знезаражувальної установки згідно з частиною 5 додатка «Міжнародної конвенції про контроль судових баластних вод і осадів та управління ними 2004 року».

АСУ забезпечує зберігання даних протягом щонайменше 24 місяців, що відповідає дотриманню правила В-2 вимог до обладнання систем контролю та моніторингу.

Перспективи розвитку. Окремого розгляду потребує проблема обробки осаду. Зважаючи на його значно менший об'єм, але більшу в'язкість насиченість домішками та мікроорганізмами, а також меншу оптичну прозорість, застосовувати обробку з ультрафіолетовим випромінюванням буде малоефективним. Для цього доцільно застосовувати обробку електричними імпульсами. Про ефективність такого підходу свідчать роботи [13, 20]. Під дією імпульсного електричного розряду у воді генеруються потужні

ударні хвилі які призводять до збудження кавітації, яка характеризується аномально високим тиском (понад 200 МПа) та температурою (понад 5000 К). Імпульсна кавітація призводить до руйнування захисних оболонок і клітин мікроорганізмів, що суттєво полегшує процес контакту цих мікроорганізмів з окиснювачем. У випадку попередньої електрофізичної обробки високовольтними імпульсами та введення в камеру знезараження невеликих кількостей ініціатору – перекису водню забезпечує посилення знезаражувального ефекту, чинить летальну дію на фітопланктон, який перебуває у воді та призводить до зниження величини знезаражувальної дози УФ-випромінювання, що, зі свого боку, зменшує енергоємність процесу знезараження, але потребує урахування витрат електроенергії на роботу електроімпульсної установки. Також слід шукати компроміс між гідродинамічними втратами в камері обробки, які підсилюються, наприклад, при поперечному розміщенні УФ джерел, про що зазначається в роботах [4, 21] та рівномірністю опромінення середовища за рахунок його перемішування при зіткненні потоку з конструкційними перешкодами.

Висновки. При проектуванні системи управління баластними водами необхідно:

- оптимізувати співвідношення енергетичних витрат, що складаються з живлення насосного устаткування та джерел ультрафіолетового випромінювання;
- передбачити можливість заміни джерел випромінювання з урахуванням загального компонування обладнання в приміщенні судна;
- забезпечити можливість автоматизованого ведення реєстру наповнень та скидів баластної води зі збереженням даних;
- контролювати інтенсивність випромінювання та швидкості проходження води, як параметрів, що підтверджують обробку води належними дозами.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Дзигар А. К. Реалізація вимог міжнародної конвенції з управління баластними водами на судах компанії OFFSHORE HEAVY TRANSPORT. Сучасні енергетичні установки на транспорті і технології та обладнання для їх обслуговування. 10-а Міжнародна науково-практична конференція, 12–13 вересня 2019 р. Херсон: Херсонська державна морська академія.
2. Varlan T. / Application of ballast water treatment systems and minization of harmful impacts on the marine ecosystem // No. sge 16–01 (2023): Science for modern man '2023 <https://doi.org/10.30890/2709-2313.2023-16-01-019>.
3. Šateikienė D., Janutėnienė J. / Ballast water treatment technologies comparative analysis // Proceedings of 16th International Conference. Transport Means. 2012.
4. Apetroaei M. R., Atodiresei D. V., Rău, et.a. / Overview on the practical methods of I. ballast water treatment // IOP Conf. Series: Journal of Physics: Conf. Series 1122 (2018) 012035 <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1122/1/012035>.
5. Базалєєв Н. І., Клепиков В. Ф., Литвиненко В. В. Моделювання і прогнозування змін фізико-хімічних властивостей матеріалів під впливом випромінювань // Доповіді НАН України (4), с. 82–86 (1997).
6. Базалєєв М. І., Клепиков В. Ф., Литвиненко В. В., Шаляпін С. М. Електрофізичні променеві технології: нова концепція знезараження води ультрафіолетовими променями // Наука та інновації. 2005. т.1., №1. с. 99–109.
7. Базалєєв М. І., Клепиков В. Ф., Литвиненко В. В. Електрофізичні радіаційні технології. Харків: Акта, с. 206 (1998).
8. Донець С. Є., Литвиненко В. В., Прохоренко Є. М. / Термографічний метод діагностики та оцінки ефективності роботи установок для променевого знезараження води // Вісник Сумського національного аграрного університету. Серія «Механізація та автоматизація виробничих процесів», випуск 1 (43), 2021. с. 3–7.

9. Kciuk M., Marciniak B., Mojzych M., Kontek R. / Focus on UV-Induced DNA Damage and Repair—Disease Relevance and Protective Strategies // *Int. J. Mol. Sci.* 2020, 21, 7264; <https://doi.org/10.3390/ijms21197264>.
10. Gibson J., Farnood R., Seto P. Chemical pretreatment of combined sewer overflows for improved UV disinfection. *Water Sci Technol* (2016) 73:375–381. <https://doi.org/10.2166/wst.2015.447>.
11. Cantwell R. E. , Hofmann R. / Ultraviolet absorption properties of suspended particulate matter in untreated surface waters // *Water Research*. V. 45, Iss. 3, January 2011, Pages 1322–1328 <https://doi.org/10.1016/j.watres.2010.10.020>.
12. Клименко В. Г. Загальна гідрологія: навчальний посібник для студентів В. Г. Клименко. Харків, ХНУ імені В.Н. Каразіна, 2012. 254 с.
13. Бойко Н. І., Макогон А. В. Високовольтна установка імпульсною потужністю 3 МВт для знезараження води у потоці за допомогою наносекундних розрядів у газових бульбках. *Технічна електродинаміка*. 2020. № 5. С. 80–83. <https://doi.org/10.15407/techned.2020.05.080>.
14. МУ 3.2.1757-03 «Санітарно-паразитологічна оцінка ефективності. Знезараження води УФ випромінюванням».
15. <https://www.waterlight.pro/uf-znezarazhennya-vody/>.
16. Zhang N., Hu K., Shan B./ Ballast water treatment using UV/TiO₂ advanced oxidation processes: An approach to invasive species prevention // *Chemical Engineering Journal* 243:7–13 <https://doi.org/10.1016/j.cej.2013.12.082>.
17. Guney C. B. / Ballast water problem: Current status and expected challenges // *Mar. Sci. Tech. Bull.* (2022) 11(4): 397–415 <https://doi.org/10.33714/masteb.1162688>.
18. Горбов В. М., Мітенкова В. С., Тимофєєва А. С. Порівняльна оцінка економічної ефективності способів обробки баластних вод / *Науковий вісник Херсонської державної морської академії*. №1(8). 2013. с. 35–44.
19. Turnpenny A. W. H., Coughlan. J. Ng. B., Crews P., Bamber R. N., Rowles P. / *Cooling Water Options for the New Generation of Nuclear Power Stations in the UK* // Published by: Environment Agency, Rio House, Waterside Drive, Aztec West, Almondsbury, Bristol, BS32 4UD.
20. Тірон-Воробйова Т. Н., Данилян А. Г., Рмановська О. Р. Баластна вода: електрогідродар Юткіна – один із дієвих шляхів щодо її знезараження // *Технології захисту навколишнього середовища*. №4. 2019. с. 67–72 [https://doi.org/10.15589/znp2019.4\(478\).10](https://doi.org/10.15589/znp2019.4(478).10).
21. Маслов І. З., Данилян А. Г., Тірон-Воробйова Н. Б., Романовська О. Р., Бабак А. А. / *Установка для очистки баластних вод* // *Екологічні науки* №2 (25). 2019. с. 104–108. <https://doi.org/10.32846/2306-9716-2019-2-25-16>.

REFERENCES

1. Dzygar, A. K. (2019). Implementation of the requirements of the international convention on ballast water management on ships of the company OFFSHORE HEAVY TRANSPORT. Modern power plants on transport and technologies and equipment for their maintenance. 10th International Scientific and Practical Conference, September 12–13, Kherson: Kherson State Maritime Academy.
2. Varlan, T. (2023). / Application of ballast water treatment systems and minization of harmful impacts on the marine ecosystem // No. sge16–01: Science for modern man '2023 <https://doi.org/10.30890/2709-2313.2023-16-01-019>.
3. Šateikienė, D., Janutėnienė, J. (2012). / Ballast water treatment technologies comparative analysis // *Proceedings of 16th International Conference. Transport Means*.
4. Apetroaei, M. R., Atodiresei, D. V., Rău, I., Apetroaei, G. M., Lilius, G. and Schroder, V. (2018). / Overview on the practical methods of ballast water treatment // *IOP Conf. Series: Journal of Physics: Conf. Series* 1122. 012035, <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1122/1/012035>.

5. Bazaleev, N. I., Klepikov, V. F., Lytvynenko, V. V. (1997). / The simulation and forecasting changes in the physical and chemical properties of materials under the influence of radiation // Reports NAS of Ukraine (4), c. 82–86.
6. Bazaleev, N. I., Klepikov, V. F., Lytvynenko, V. V., Shaliapin, S. M. (2005). / Electrophysical Beam Technologies: A New Concept of Water Disinfection with Ultraviolet Rays./ Science and Innovation. v.1., №1. p.99–109.
7. Bazaleev, N. I., Klepikov, V. F., Lytvynenko, V. V. (1998). Electrophysical radiation technologies. Kharkiv: Acta, p. 206.
8. Donets, S. E., Lytvynenko, V. V., Prokhorenko, E. M. (2021). / Thermographic method for diagnosis and estimation the efficiency of installations for uv ray disinfection of water// Bulletin of Sumy State National Agrarian University. Ser. Mechanization and Automation of Production Processes- v 1 (43). c. 3–7.
9. Kciuk, M., Marciniak, B., Mojzych, M., Kontek, R. (2020). / Focus on UV-Induced DNA Damage and Repair—Disease Relevance and Protective Strategies // Int. J. Mol. Sci, 21, 7264; <https://doi.org/10.3390/ijms21197264>.
10. Gibson, J., Farnood, R., Seto, P. (2016). Chemical pretreatment of combined sewer overflows for improved UV disinfection. Water Sci Technol 73:375–381. <https://doi.org/10.2166/wst.2015.447>.
11. Cantwell, R. E., Hofmann, R. (2011). / Ultraviolet absorption properties of suspended particulate matter in untreated surface waters // Water Research. V. 45, Iss. 3, January, Pages 1322–1328 <https://doi.org/10.1016/j.watres.2010.10.020>.
12. KLymenko, V. G. (2012). Zagalna gidrogeologiya: navchalniy posibnyk dlia studentiv. – Kharkiv. HNU imeni V. N. Karazina, 254 s.
13. Boyko, N. I., Makogon, A. V. (2020). High voltage plant with 3 MW pulse power for disinfection flow of water by nanosecond discharge in gas bubbles. Teknichna elektrodynamika. № 5. p. 80–83. <https://doi.org/10.15407/techned2020.05.080>.
14. MU 3.2.1757-03 “Sanitary and parasitological assessment of effectiveness. Water disinfection with UV radiation”.
15. <https://www.waterlight.pro/uf-znezarazhennya-vody/>.
16. Zhang, N., Hu, K., Shan, B. (2013). / Ballast water treatment using UV/TiO₂ advanced oxidation processes: An approach to invasive species prevention // Chemical Engineering Journal 243:7–13 <https://doi.org/10.1016/j.cej.12.082>.
17. Guney, C. B. (2022). / Ballast water problem: Current status and expected challenges // Mar. Sci. Tech. Bull. 11(4): 397–415 <https://doi.org/10.33714/masteb.1162688>.
18. Gorbov, V. M., Mitienkova, V. S., Tymofeeva, A. S. (2013). The energy efficiency comparative evaluation of ballast water treatment directions // Scientific Bulletin of the Kherson State Maritime Academy. №1 (8). c. 35–44.
19. Turnpenny, A. W. H., Coughlanю, Jю Ng. B., Crews, P., Bamber, R. N., Rowles, P. / Cooling Water Options forthe New Generation of Nuclear Power Stations in the UK // Published by: Environment Agency, Rio House, Waterside Drive, Aztec West, Almondsbury, Bristol, BS32 4UD.
20. Tiron-Vorobiova, N. B., Danylian, A. G., Romanovska, O. R. (2019). Ballast water: Yutkins electro-hydraulic shock is one of the effective ways to disinfect it // Tekhnologii zahystu navkolyshniogo seredovyscha. №4. p. 67–72 [https://doi.org/10.15589/znp2019.4\(478\).10](https://doi.org/10.15589/znp2019.4(478).10).
21. Maslov, I. Z., Danilyan, A. G., Tiron-Vorobyova, N. B., Romanovska, O. R., Babak, A. A. (2019). / Ballast water treatment plant // Environmental Sciences №2 (25). c. 104–108. <https://doi.org/10.32846/2306-9716-2019-2-25-16>.

Lytvynenko V. V., Shaliapin S. M. FEATURES TO OPTIMIZE BALLAST WATER TREATMENT TECHNOLOGY USING ULTRAVIOLET RADIATION

The problems of development and implementation of ballast water disinfection technologies using ultraviolet radiation and advanced oxidation processes are considered. The main water parameters that determine the requirements for the total intensity of radiation sources are analysed. A scheme for forming a disinfection effect is proposed, which takes into account the role of radiation factors, water parameters and reagent activity. The biophysical processes that occur when broad-spectrum ultraviolet radiation acts on microorganisms are analysed. Organizational and technical measures that must be taken into account when implementing these technologies on ships are considered. Using the example of a pilot plant, a list of competencies that ship personnel must master to comply with the standards for the operation of the plant is given. The technical and economic indicators of the ballast water disinfection plant are given, which should be used as a basis when designing the plant for the customer. The design of the plant for ballast water disinfection with ultraviolet radiation is proposed. Methods of controlling the formation of sediment on the surface of ultraviolet radiation sources are described and the method of cleaning them from sediment is proposed. A scheme for cleaning ballast water during pumping into the tank and during de-ballasting is developed. The possibility of modular arrangement of the disinfection system is provided for the purpose of optimal location of equipment in ship's premises. A system for automatic control of ballast water purification technology is described. Directions for improving installations for more complete performance of the functions of neutralizing microorganisms carried by ballast water are indicated.

Key words: ballast water disinfection; ultraviolet radiation; optical characteristics of water; filtration; treatment regulations, technical and economic indicators.

© Литвиненко В. В., Шаляпін С. М.

Статтю прийнято до редакції 25.11.2024