

Міністерство освіти і науки України  
Національний університет «Одеська морська академія»  
Навчально-науковий інститут інженерії  
Кафедра безпеки життєдіяльності та захисту довкілля

## ДИПЛОМНА РОБОТА МАГІСТРА

на тему:

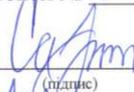
### ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ОЧИЩЕННЯ СУДНОВИХ ВОД, ЩО МІСТЯТЬ НАФТУ

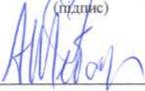
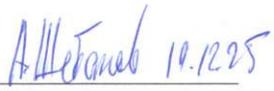
Курсанта: Горайчука Семена Семеновича 

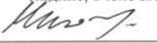
Керівник: к-т техн. наук, доцент Парменова Д. Г. 

Нормоконтроль  к. т. н., доц. Парменова Д. Г.

Роботу заслухано на засіданні кафедри безпеки життєдіяльності та захисту довкілля. Рекомендовано до захисту в ЕК, протокол № 9 від 15 грудня 2025 р.  
Завідувач кафедри БЖтаЗД к-т техн. наук, доцент  Д. Г. Парменова

Роботу заслухано на засіданні кафедри суднових енергетичних установок.  
Рекомендовано до захисту в ЕК, протокол № 9 від 17.12 2025 р.  
Завідувач кафедри СЕУ,  
д-р техн. наук, професор  С.В. Сагін

Рецензент (зовнішній)   14.12.25  
(підпис, вчене звання, ПІБ, дата)

Рецензент (внутрішній)  М.В. Мірошова д. т. н., проф  
(підпис, вчене звання, ПІБ, дата)

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач випускової кафедри

  
д-р техн.н., проф. Сагін С.В.  
« 08 » 09 2025 р.

## ЗАВДАННЯ

на виконання дипломної роботи магістра

Курсант ННІІ **Горайчук Семен Семенович**

1. Тема дипломної роботи: **«Підвищення ефективності очищення суднових вод, що містять нафту»**

Затверджена наказом ректора НУ ОМА № 1414 від 24 листопада 2025 р.

2. Об'єкт дослідження: **процеси очищення вод, що містять нафту**

3. Предмет дослідження: **ефективність використання комбінованих методів видалення нафти в суднових умовах**

4. Обсяг пояснювальної записки: **60-70 сторінок.**

5. Структура пояснювальної записки дипломної роботи:

**Вступ, Реферат, Зміст, Перелік скорочень,**

**Огляд методів очищення нафтовмісних вод,**

**Загальна методика наукового дослідження,**

**Аналіз методів підвищення ефективності видалення нафти,**

**Підвищення ефективності очищення нафтовмісних суднових стічних вод за допомогою використання комбінованої системи очищення із нанотехнологіями,**

**Висновки, Список використаних джерел**

6. Зміст основної частини пояснювальної записки (перелік питань, що підлягають розробці):

**Огляд методів очищення нафтовмісних вод,**

**Загальна методика наукового дослідження,**

**Аналіз методів підвищення ефективності видалення нафти,**

**Підвищення ефективності очищення нафтовмісних суднових стічних вод за допомогою використання комбінованої системи очищення із нанотехнологіями**

7. Перелік графічного матеріалу: **Принципова схема роботи установки СЛВ,**

**Сепараційна установка PureVilge, Технологічна карта наукового дослідження,**

**Спрощена схема роботи СЛВ, Конструкція коалесцера з використанням**

**волокнистих шарів, Загальна схема очищення льяльних вод, Загальний вигляд**

**схем сепараторів для очищення нафтовмісних вод, Принципова схема роботи**

**мембранної технології, Порівняння методів очищення за залишковою**

**концентрацією (ppm), Зображення нановолокон та наночастинок, Використання**

**нанотехнологій для очищення нафтовмісних льяльних вод на судах**

## РЕФЕРАТ

Дипломна робота магістра на тему: «Підвищення ефективності очищення суднових вод, що містять нафту» містить 70 с., 17 рис., 2 табл., 56 джерел, 21 слайдів презентаційного матеріалу.

Магістерське наукове дослідження спрямоване на розв'язання науково-прикладного завдання – підвищення ефективності очищення нафтовмісних суднових стічних вод у відповідності до міжнародних екологічних стандартів шляхом впровадження сучасних нанотехнологічних методів.

Підтверджена наукова гіпотеза про те, що використання магнітних наночастинок у складі сорбційно-мембранних систем дозволяє суттєво покращити якість очищення стічних вод при оптимальних витратах енергії, що робить такі технології придатними для використання на морських судах.

Проведено порівняльний аналіз традиційних (механічних, хімічних) та інноваційних (нанотехнологічних) методів очищення. Встановлено, що застосування наночастинок з модифікованою поверхнею забезпечує зниження залишкової концентрації нафти у воді до рівня менше  $5 \text{ млн}^{-1}$ , що відповідає вимогам Конвенції MARPOL Annex I.

У результаті техніко-економічного обґрунтування встановлено: ефективність очищення зростає з 65-80 % до 90-99%; вартість очищення  $1 \text{ м}^3$  зменшилася на 40 %; загальні річні втрати на штрафи та утилізацію значно зменшуються; термін окупності проєкту становить 3-7 років.

Результати дослідження показали перспективність впровадження нанотехнологій у суднові системи очищення вод з урахуванням їхньої ефективності, компактності та відповідності екологічним нормам.

**НАФТОВМІСНІ СТІЧНІ ВОДИ, СУДНОВА СИСТЕМА ОЧИЩЕННЯ,  
НАНОТЕХНОЛОГІЇ, НАНОЧАСТИНКИ, MARPOL, ЕКОЛОГІЧНА БЕЗПЕКА,  
ЕНЕРГОЕФЕКТИВНІСТЬ**

## ABSTRACT

Master's Thesis titled: "Improving the Efficiency of Oily Water Treatment on Ships" comprises 70 pages, 17 figures, 2 tables, 56 references, 21 presentation slides.

The master's research focuses on solving an applied scientific problem – improving the efficiency of treating oil-containing ship wastewater in accordance with international environmental standards through the implementation of modern nanotechnological methods.

The scientific hypothesis has been confirmed: the use of magnetic nanoparticles within sorption–membrane systems significantly enhances wastewater treatment quality at optimal energy consumption, making such technologies suitable for use on marine vessels.

A comparative analysis of traditional (mechanical, chemical) and innovative (nanotechnological) treatment methods was conducted. It was found that the application of surface-modified nanoparticles reduces the residual oil concentration in water to below  $5 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ , which complies with the requirements of MARPOL Annex I.

The techno-economic assessment established that: treatment efficiency increases from 65–80% to 90–99%; the cost of treating  $1 \text{ m}^3$  decreases by 40%; annual overall losses due to fines and disposal decrease; the project payback period is 3–7 years.

The research results demonstrate the prospects of implementing nanotechnologies in shipboard water treatment systems, considering their efficiency, compactness, and compliance with environmental regulations.

OIL-CONTAINING WASTEWATER, SHIPBOARD TREATMENT SYSTEM, NANOTECHNOLOGIES, NANOPARTICLES, MARPOL, ENVIRONMENTAL SAFETY, ENERGY EFFICIENCY

## ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ, СКОРОЧЕНЬ, АБРЕВІАТУР І ТЕРМІНІВ	8
ВСТУП	9
1 АНАЛІЗ ПРОБЛЕМИ ОЧИЩЕННЯ СУДНОВИХ ВОД ВІД НАФТИ	10
1.1 Вимоги міжнародних та національних стандартів до очищення суднових вод	10
1.2 Вплив нафтових забруднень на морське середовище та судові системи	13
2 ЗАГАЛЬНА МЕТОДИКА НАУКОВОГО ДОСЛІДЖЕННЯ	19
2.1 Процес наукового пізнання	19
2.2 Методологічні принципи наукових досліджень	20
2.3 Обґрунтування мети і завдань дослідження	22
2.4 Висновки за розділом 2	23
3 МЕТОДИ ТА ТЕХНОЛОГІЇ ОЧИЩЕННЯ НАФТОВМІСНИХ СУДНОВИХ ВОД	25
3.1 Фізичні методи очищення нафтовмісних вод	26
3.2 Фізико-хімічні методи очищення	31
3.3 Хімічні методи очищення	35
3.4 Біологічні методи очищення	36
3.5 Мембранні системи та ультразвукове очищення	39
3.6 Висновки за розділом 3	42
4 АНАЛІЗ ПРОЦЕСІВ ОЧИЩЕННЯ ДЛЯ ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ	44
4.1 Основні фактори, що впливають на ефективність очищення	44
4.2 Порівняння різних технологій видалення нафти з води	45
4.3 Використання нанотехнологій для очищення нафтовмісних стічних вод на судах	46
4.4 Оцінка ефективності інноваційних методів порівнянно з традиційними	53
4.5 Висновки за розділом 4	54

	7
5 ЕКОЛОГІЧНІ ТА ЕКОНОМІЧНІ АСПЕКТИ ВПРОВАДЖЕННЯ НАНОЧАСТИЧЕК	56
5.1 Вплив нанотехнологій на навколишнє середовище	56
5.2 Економічне обґрунтування модернізації систем очищення	58
5.3 Перспективи розвитку технологій очищення суднових вод	60
5.4 Висновки за розділом 5	61
ВИСНОВКИ	62
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	64

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ, СКОРОЧЕНЬ, АБРЕВІАТУР І  
ТЕРМІНІВ

СЛВ – сепаратор лляльних вод

PPM – Parts per million

ІВН – ідентифікатор вмісту нафтопродуктів

КЗМС – комітет захисту морського середовища

ВМН – води, що містять нафту

МЕРС.107(49) – резолюція комітету із захисту морського середовища (Marine Environment Protection Committee)

СЕУ – суднова енергетична установка

PureBilge – комерційна система очищення нафтовмісних вод, що використовує високошвидкісний відцентровий сепаратор

р.т. – реєстрові тонни (реєстрова місткість судна)

МС – механічний сепаратор

ГР – гравітаційне розділення

ФРП – флотація розчиненим повітрям

БМ – біологічний метод

АРО (AGR) – аеробна грануляція (англ. Aerobic Granulation Reactor)

БТ – біотехнологія

МВР – мембранний біореактор (Membrane BioReactor)

SBR – періодичний біореактор секвенування (Sequencing Batch Reactor)

МВВР-МВР – мембранний біореактор з рухомим шаром біоплівки (Moving Bed Biofilm Reactor – Membrane BioReactor)

МСТ – мембранна система технологій (Membrane Separation Technology)

## ВСТУП

Міжнародна морська організація (ІМО) та інші міжнародні регулятори встановлюють все більш суворі обмеження на викиди нафтових забруднень у морські води. Це обумовлено необхідністю мінімізації негативного впливу судноплавства на морське середовище, включно із забрудненням нафтою, нафтопродуктами та похідними від них речовинами. Однією з ключових є очищення нафтовмісних стічних вод, що утворюються під час експлуатації суден і можуть містити емульговані нафтопродукти.

Традиційні методи очищення, такі як механічне відстоювання, фізико-хімічна коагуляція та біологічні процеси, мають обмежену ефективність у видаленні дрібнодисперсних частинок і емульгованих нафтопродуктів. Їхня чутливість до коливань температури та рівня рН знижує стабільність процесу очищення й може спричиняти утворення вторинних забруднень.

Особливої актуальності набуває застосування нанотехнологій, які забезпечують високоефективну адсорбцію та каталіз нафтових забруднень навіть при низьких концентраціях і складних експлуатаційних умовах. Магнітні наночастинки  $Fe_3O_4$  дозволяють швидко видаляти адсорбент із забрудненням за допомогою магнітного поля, а вуглецеві наноматеріали, такі як CNT та оксид графену, завдяки великій площі поверхні та пористій структурі забезпечують високу селективність адсорбції. Гібридні системи  $Fe_3O_4@CNT$  та  $GO@Fe_3O_4$  поєднують переваги обох класів матеріалів, демонструючи максимальну ефективність і компактність, що особливо важливо для умов морського транспорту.

Екологічна безпека застосування нанотехнологій передбачає контроль за можливим потраплянням наночастинок у довкілля, розробку замкнених циклів регенерації та утилізації, а також стабільності матеріалів у природних умовах. З економічної точки зору, модернізація систем очищення дозволяє скоротити витрати на утилізацію відходів, обслуговування обладнання та штрафи за недотримання стандартів, що робить інвестиції у нанотехнології доцільними.

## 1 АНАЛІЗ ПРОБЛЕМИ ОЧИЩЕННЯ СУДНОВИХ ВОД ВІД НАФТИ

### 1.1 Вимоги міжнародних та національних стандартів до очищення суднових вод

Україна ратифікувала Міжнародну конвенцію щодо запобігання забрудненню з суден (MARPOL 73/78) 21 вересня 1993 року. З 25 січня 1994 року положення Конвенції стали обов'язковими для України, що свідчить про офіційне визнання та прийняття Україною міжнародних норм щодо охорони морського середовища від забруднення з суден.

Всі сторони, які підписали дану Конвенцію, усвідомлювали необхідність охорони морського середовища, визнаючи, що навмисне або випадкове скидання по недбалості з суден нафти та інших шкідливих речовин є серйозним джерелом забруднення. Додаток I «Правила запобігання забрудненню нафтою з суден» набув чинності 02.10.1983р. Цей додаток регламентує правила щодо категорії речовин, що утворюються на судні, а саме поняття – нафта. До поняття «нафта» входять наступні речовини:

1. Нафта, що перевозиться як вантаж.
2. Нафтовмісні води ллял машинних відділень.
3. Нафтозалишки та продукти сепарації палив.
4. Нафтове паливо та мастило.

Дедалі частіше можна спостерігати картину того, що однією з головних проблем сучасності стає загроза забрудненню вод світового океану, у першу чергу – нафтопродуктами. Правило 9 Додатку I Міжнародної конвенції MARPOL 73/78 регламентує обмеження скидання нафти. З урахуванням положень, передбачених правилами 10 і 11 додатка конвенції і пунктом 2 правила 9, забороняється будь-яке скидання в море нафти або суміші, що містять нафту. Для суден валовою місткістю 400 рег. тонн та більше, а також для танкерів 150 рег. тонн та більше, води, що містять нафту, які походять з ллял машинних приміщень суден, повинні або

зберігатися на борту для подальшого скидання в приймальні споруди, або скидатися в море відповідно до таких положень:

- 1) судно знаходиться в процесі руху;
- 2) на судні експлуатується обладнання конструкції, схваленої державою прапору, яке забезпечує, щоб вміст нафти в стоку без його розведення не перевищував 15 ppm (parts per million);
- 3) на нафтових танкерах нафтовмісна суміш не має походити з ллял відділення вантажних насосів;
- 4) у разі нафтових танкерів нафтовмісна суміш не змішана з залишками вантажу нафти.

Таким чином, роль сепаратора лляльних вод (СЛВ) у запобіганні забруднення навколишнього середовища досить велика.

За вимогами Додатку I сучасний СЛВ повинен забезпечити якість очищення, при якій вміст нафтопродуктів у воді на виході не перевищує 15 ppm. Наявність СЛВ на борту судна є обов'язковим та необхідним пунктом зараз, а в майбутньому система очистки лляльних вод буде містити не один сепаратор, а декілька.

За правилом 14 Додатку I «Обладнання для фільтрації нафти» будь яке судно валовою місткістю 400 р.т. і більше, має бути оснащено обладнанням для фільтрації нафти, яке забезпечує очищення нафтовмісної суміші, що скидається в море, до концентрації нафти в очищеному стоку не більше ніж 15 мільйонних частин [1].

Відповідно до правила 14, обладнання для запобігання забрудненню нафтою повинно включати: сепаратор лляльних вод на 15 млн<sup>-1</sup>, попереджувальний сигналізатор на 15 млн<sup>-1</sup> та пристрій автоматичного припинення скидання. Принципова схема роботи установки СЛВ зображена на рисунку 1.1.

Суднова установка очищення нафтовмісних вод на 15млн<sup>-1</sup> повинна мати надійну конструкцію, розраховану для суднового застосування з урахуванням її передбачуваного розміщення на судні.

Установка очищення нафтовмісних вод 15млн<sup>-1</sup> має бути спроектована для автоматичної роботи із призначенням безвахтового обслуговування, щонайменше, протягом 24 години, проте повинні бути передбачені надійні заходи для

виключення будь-якого скидання у випадку несправності. Кожен СЛВ повинен очищати лляльні води з машинного відділення до чистої води із вмістом нафтопродуктів і будь-яких інших забруднювачів не вище рівня  $15 \text{ млн}^{-1}$ .

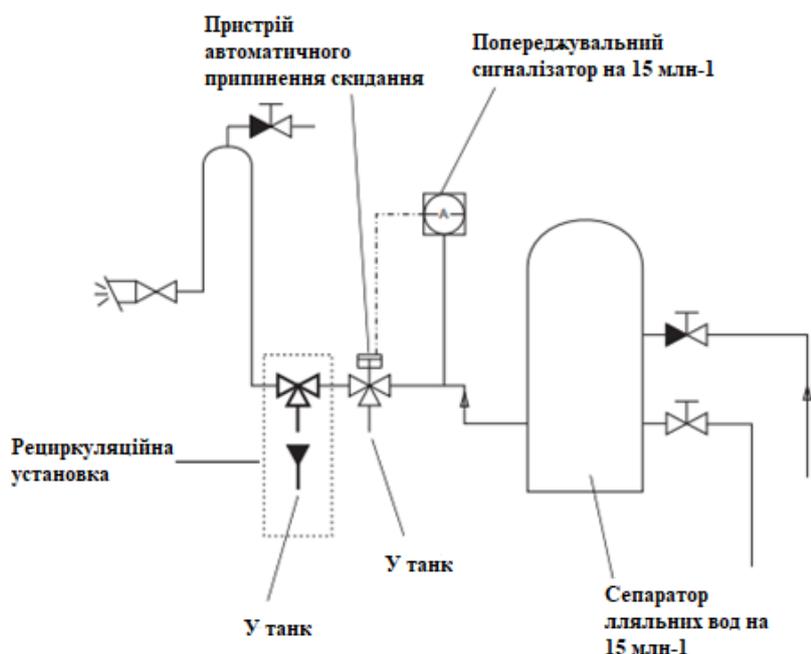


Рисунок 1.1 – Принципова схема роботи установки СЛВ [2]

Копія Свідоцтва про схвалення типу сепаратора лляльних вод на  $15 \text{ млн}^{-1}$  повинна постійно перебувати на борту судна, на якому встановлено таке обладнання.

Попереджувальний сигналізатор на  $15 \text{ млн}^{-1}$  – означає прилад, що сигналізує про вміст нафти в скиданні більше  $15 \text{ млн}^{-1}$ . Він повинен бути стійким до корозії у мовах морського середовища. Цей пристрій повинен бути оснащений електричним / електронним пристроєм, попередньо налаштованим виробником на спрацювання, коли вміст нафти в стоці перевищує  $15 \text{ млн}^{-1}$  з одночасною подачею команди на керування автоматичним запірним пристроєм для припинення скидання за борт. Світлові і звукові сигнали повинні бути виведені до місця несення вахти обслуговуючим персоналом.

Попереджувальний сигналізатор на  $15\text{млн}^{-1}$  має реєструвати дату, час і стан сигналу, а також робочий стан суднової установки очищення нафтовмісних вод на  $15\text{млн}^{-1}$ .

Пристрій автоматичного припинення скидання забезпечує припинення скидання нафтовмісної суміші за сигналом приладу. Пристрій автоматичного припинення скидання повинний складатися з клапанного пристрою, встановленого на трубопроводі суднової установки очищення нафтовмісних вод на  $15\text{млн}^{-1}$  для випуску стоку за борт, та автоматично направляє скидання суміші стоку в суднові лляла або збірну цистерну, коли вміст нафти в стоці перевищує  $15\text{млн}^{-1}$ .

## 1.2 Вплив нафтових забруднень на морське середовище та суднові системи

Очищення вод, що містять нафту (ВМН) на морському транспорті вважається однією з пріоритетних екологічних завдань, оскільки нафта і нафтопродукти є найбільш поширеними антропогенними забруднювачами, які негативно впливають на стан морських екосистем.

До складу ВМН на сучасних суднах морського та внутрішнього водного транспорту крім води входять паливо, мастило, що призначено для мащення деталей та механізмів, гідравлічне мастило, миючі препарати та ін. Загальна кількість ВМН, що скидаються із суден за абсолютним значенням в порівнянні з аварійними розливами танкерів невелика, але їх вплив на екологічний стан морського середовища має велике значення, особливо при збільшенні числа суден, їх тоннажу та інтенсивності судноплавства. Тому все більш актуальною стає проблема про обмеження їх скидання, та підвищення вимог до якості очищення ВМН перед скиданням у море.

Відповідно до вимог Конвенції MARPOL 73/78 і резолюції МЕРС.107(49), в міжнародних водах дозволяється скидати за борт очищені ВМН з концентрацією нафтопродуктів не більше  $15\text{млн}^{-1}$ . Очікується подальше посилення законодавства і зниження допустимої концентрації нафтопродуктів у воді, що скидається в море,

до  $5 \text{ млн}^{-1}$  (в акваторії Великих озер таке обмеження вже діє), і повна заборона скидання ВМН в життєво важливі водойми.

Досягнення таких показників забруднень в очищеній воді (з урахуванням концентрації нафтопродуктів у вихідній воді близько  $1000\text{...}2000 \text{ млн}^{-1}$ ) можливе лише за умовою багатоступінчастої обробці ВМН. В даний час судна морського та внутрішнього водного транспорту, як правило, оснащені двохступінчастими очисними установками ВМН: на першому ступені – сепараторами гравітаційного або флотаційного типу; на другому ступені фільтрами різних конструкцій (з коалесцентними елементами, адсорбційним завантаженням та ін.). Надмірне накопичення ВМН на борту судна (в ляла машинного відділення, збірних колодязях, танках) може призвести до необхідності припинення роботи судового обладнання та судових систем [3]. Тому очищення ВМН та їх подальше видалення з борту судна повинні виконуватися за найкоротший проміжок часу. При цьому необхідно враховувати можливість знаходження судна в прибережній акваторії, в якій скидання ВМН заборонено та тому неможливо. Тому дослідження способів, що забезпечують якісне та швидке очищення ВМН є актуальним науково-прикладним завданням, реалізація якого завжди буде затребувана на судах морського та внутрішнього водного транспорту.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Для виділення нафтопродуктів з ВМН вод на судні має бути сепараційне та фільтрувальне обладнання. Судна, що не мають фільтруючого обладнання, повинні зберігати всі ВМН на борту та здавати їх на берегові або плавучі приймальні споруди.

Відповідно до існуючих вимог будь-яке судно валовою місткістю 400 рег. тонн і більше, але менше ніж 10000 рег. тонн має бути оснащене фільтруючим обладнанням. Відповідно до Додатку I, Правила 16, Конвенції MARPOL 73/78, судно валовою місткістю 10000 рег. тонн і більше повинно бути оснащене фільтруючим обладнанням та пристроєм сигналізації та автоматичного припинення скидання нафтовмісної суміші у разі, якщо вміст нафти у стоку перевищує  $15 \text{ млн}^{-1}$ .

Нафтоочисне обладнання за ступенем очищення ВМН поділяється на [3]:

- ❖ нафтоводяне обладнання, що сепарує, – це сепаратор або фільтр або їх комбінація, які забезпечують отримання вмісту нафти в ВМН менше  $100 \text{ млн}^{-1}$ ;
- ❖ нафтофільтрувальне обладнання – це комбінація пристроїв (сепаратора, фільтра, коалесцентного елемента), яка забезпечує отримання вмісту нафти в ВМН не більше  $15 \text{ млн}^{-1}$ ; за принципом дії нафтоводяні сепараційні установки можна умовно по-ділити на такі основні типи:
  - ❖ гравітаційні (природний відстій) – найбільш економічні, але цей тип сепараційних установок не забезпечує необхідної якості очищення;
  - ❖ флотаційні (насичення води, що очищається дрібними бульбашками повітря, які при спливанні захоплюють за собою частинки нафтопродуктів і утворюють при цьому нафтоводяну піну, що скидається в збірну цистерну);
  - ❖ коалесцентні (процес укрупнення частинок нафтопродуктів за рахунок їх злиття на фільтруючому елементі, після чого краплі відокремлюються і збираються у збірний танк);
  - ❖ фільтраційні (затримання частинок нафтопродуктів шаром матеріалів, що фільтрують);
  - ❖ відцентрові (розподіл частинок різної щільності при впливі відцентрових сил).

**Постановка завдання.** Метою дослідження є оптимізації технологічної схеми очищення ВМН, при якій забезпечується вміст нафти в ВМН перед її видаленням за борт не більше  $15 \text{ млн}^{-1}$  за найменший час з найменшими втратами енергії.

**Виклад основного матеріалу дослідження.** Для успішного вирішення завдання підвищення ефективності очищення ВМН безпосередньо в суднових умовах необхідно використовувати комплексний системний підхід, якій дозволяє враховувати вплив усіх елементів суднової енергетичної установки на якість очищення.

З проведеного аналізу різних способів і типів сепараторів для очищення вод, що містять нафту СЕУ витікає, що найбільш перспективними і такими, що мають значні можливості підвищення ефективності роботи є коалесцентні елементи, що

мають нежорстку структуру, що дозволяє робити їх ефективну регенерацію. До таких коалесцентних елементів при відповідному конструктивному виконанні можна віднести тканинні фільтруючі елементи, мембранні фільтруючі елементи і коалесцентні елементи, що виконані у вигляді шару гранул. Суттєвий вплив на якість очищення спричиняє тип пристрою, що перекачує і місце його розташування в системі для очищення вод, що містять нафту.

Найбільш ефективним технічним рішенням для цієї сфери застосування є динамічні системи очищення ВМН, в яких використовується метод відцентрової сепарації, реалізований за допомогою високошвидкісних тарілчастих сепараторів.

Діюча в статичних системах сепарації природна сила гравітації (навантаження  $1g$ ) в таких динамічних системах може бути збільшена в тисячі разів. Один звичайний відцентровий тарілчастий сепаратор дорівнює по ефективності традиційній статичній системі з площею відстою  $20000 \text{ м}^2$ .

Крім того, гіроскопічний ефект рідини, що обертається з високою швидкістю усередині барабана сепаратора, нівелює дію кільової і бортової хитавиці. Результат – незмінно висока ефективність розподілу компонентів. Відцентрові тарілчасті сепаратори вже впродовж десятків років демонструють прекрасну ефективність очищення дизельного палива і мастильного масла від води і твердих часток в морській індустрії.

Як сепаратор, що забезпечує виконання всіх вимог по якості очищення ВМН, доцільно використання сучасного сепаратора в комплексі з сепараційною установкою PureVilge, зображена на рисунку 1.2.

Принцип дії установки сепарації PureVilge з сепаратором показаний на рисунку 1.2. Живильний насос з регулюванням частоти направляє води, що містять нафту або трюмні води тільки з відстійного танка. Далі лляльна вода проходить через сітчастий фільтр, який затримує великі часток з рідини перед входом в теплообмінник, який піднімає температуру рідини на необхідному рівні, як правило, між  $60^{\circ}\text{C}$  і  $70^{\circ}\text{C}$ , для оптимальної ефективності розподілу. Потім триходовий перемикальний клапан направляє рідину на сепарацію, якщо дотримані усі умови технологічного процесу, такі, як температура, тиски подачі і швидкість

сепаратора. Якщо який-небудь процес умов не виконується, клапан знову перемикає циркуляцію рідини знову у відстійний танк льяльних вод. Високошвидкісний відцентровий сепаратор безперервно обробляє великі об'єми льяльних вод. Випуск масла безперервно відводиться в резервуар відпрацьованого масла. Тверді частки, які збираються на периферії чаші сепаратора відводяться з перервами в шламовий танк. Розвантаження, яке зазвичай встановлюється на 20 хвилин, відбувається в задані інтервали залежно від установки. Вбудований водяний насос, або диск дифузора, постійно розвантажує відділену льяльну воду через вихід чистої води з сепаратора. Відведення льяльних вод залежить від вмісту нафти в них, яке безперервно контролюється на точці відбору проб. Якщо вміст нафти нижче заданої межі (яка може бути встановлена в межах  $5 \dots 15 \text{ млн}^{-1}$ ), відділена ВМН може бути видалена безпосередньо за борт або в «чистий» танк ВМН для зливу за борт пізніше [3,5].

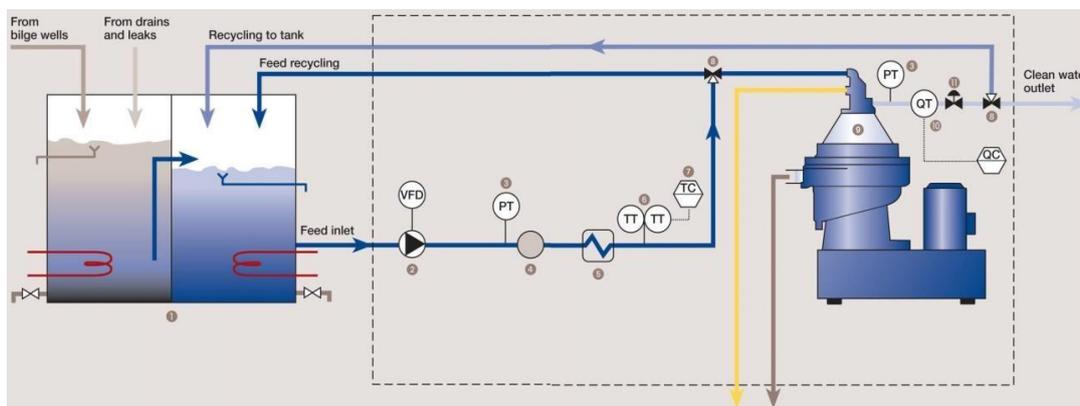


Рисунок 1.2 – Сепараційна установка PureBilge [4,6]:

- 1 – двохстадійний відстійний танк льяльних вод; 2 – живильний насос;
- 3 – манометр; 4 – фільтр; 5 – нагрівач; 6 – температурний трансмітер;
- 7 – температурний контролер; 8 – триходовий клапан переключення;
- 9 – ВWPX 307 високо швидкісний відцентровий сепаратор; 10 – водо-мастильний колектор; 11 – моделюючий клапан постійного тиску

Експлуатація сепараційного та фільтруючого обладнання повинна здійснюватися в суворій відповідності з наявними на них інструкціями. Перевищення, наприклад, швидкості перекачування, заданою інструкцією, може стати причиною збільшення вмісту нафти в водах, що скидаються. Максимальну швидкість перекачування слід застосовувати при низькій концентрації нафти та

воді, а при обробці сильно забрудненої води швидкість перекачування рекомендується знижувати. Усі відмови в роботі сепараційного та фільтруючого обладнання необхідно фіксувати у формулярах на це обладнання. У разі коли встановлене на судні обладнання через свої технічні характеристики або через несправність не може знизити вміст нафти в ВМН та / або баластових водах до максимально допустимого рівня ( $15 \text{ млн}^{-1}$ ), скидання за борт не проводиться. В цьому випадку ВМН необхідно збирати в судові відстійні цистерни з подальшим здаванням в портову приймальну споруду. [6]

При експлуатації судових енергетичних установок необхідно суворо дотримуватися вимог конвенції MARPOL 73/78, а також впроваджувати в судову енергетику технічне обладнання, яке не лише забезпечує виконання нормативних вимог цієї конвенції, але її гарантує їх виконання з високим ступенем резервування. Система повинна забезпечує рівень очищення вод, що містять нафту у діапазоні  $5 \dots 7 \text{ млн}^{-1}$ , що дозволяє безпечно скидання очищених вод в будь-яких районах Світового океану та дозволяє судовласникам виконувати відповідні існуючі на теперішній час екологічні вимоги.

## 2 ЗАГАЛЬНА МЕТОДИКА НАУКОВОГО ДОСЛІДЖЕННЯ

### 2.1 Процес наукового пізнання

Наукове пізнання починається із спостереження навколишньої дійсності – природи, техніки, технологій і т.і. Процес наукового пізнання включає, щонайменше, п'ять етапів: спостереження, вивчення, дослідження, апробацію й підтвердження [7]. На етапі спостереження дослідник накопичує інформацію про явища й процеси навколишньої дійсності, не впливаючи на неї. Спочатку формується загальне враження про пізнаванність явищ або процесів, потім здійснюється угруповання фактів дійсності за певними важливими ознаками з наступним виділенням із цих груп проблемних (не зрозумілих або не очевидних) фактів дійсності .

Етап вивчення необхідний для вибору найбільш актуальної, принципової й вчасно розв'язуваної в результаті наступних досліджень, наукової проблеми або завдання. При цьому необхідно спочатку спланувати й систематизувати дослідження в цьому напрямку.

Об'єктом наукового дослідження є процес, явище, матеріальна або ідеальна система. Предмет дослідження – це параметри внутрісистемної структури.

Головне завдання дослідження спрямоване на встановлення умов досягнення мети після одержання нових наукових результатів, що є наслідком рішення ряду допоміжних наукових завдань.

При постановці головного завдання дослідження виходять із необхідності доказу реальності передбачуваної наукової новизни. Передбачувана наукова новизна представляє нову ідею, гіпотезу, закономірність або наукову тезу про шляхи досягнення поставленої мети [8].

Процес рішення головного завдання традиційно розділяється на ряд самостійних допоміжних завдань, результати рішення яких мають елементи наукової новизни. Наукові результати надалі використовуються при доказі передбачуваної наукової новизни дослідження .

Наукове дослідження є процесом виробітку нових наукових знань, одним з видів пізнавальної діяльності. Наукове дослідження характеризується об'єктивністю, відтворюваністю, доказовістю й точністю, що може по різному визначатися в різних галузях науки.

На етапі апробації відбувається обговорення постановки, методології й результатів досліджень на різних рівнях: науково-технічних семінарах, конференціях, симпозіумах, наукових і координаційних радах і т.п.

Етап підтвердження припускає закінчення процедур апробації й публікації доказів і підтверджень у вигляді наукових положень і наукових результатів досліджень на підставі оцінки їхніх переваг і недоліків відповідно до вимог до висновки з наукової праці.

Одним з важливих елементів підтвердження є впровадження. Під ним розуміють імплементацію нових видів конструкцій, матеріалів, прогресивних технологій із застосуванням нових механізмів, пристосувань і т.д.

## 2.2 Методологічні принципи наукових досліджень

З філософської точки зору методологія постає як вчення про формування пізнання та перетворення дійсності, що передбачає застосування світоглядних принципів до процесу пізнання, духовної творчості й практичної діяльності. У межах наукового пізнання методологія визначає логіку й послідовність побудови дослідження, формує підґрунтя для вибору методів.

Метод, у цьому контексті, розглядається як впорядкована сукупність дій, спрямованих на досягнення поставленої мети чи розв'язання конкретного наукового завдання. Він охоплює систему прийомів або операцій, що використовуються у процесі як практичного, так і теоретичного пізнання дійсності.

Зважаючи на це, перед початком наукового дослідження доцільно створити технологічну карту дослідницького процесу (рис. 2.1), яка дозволяє структурувати основні етапи роботи, визначити логічну послідовність дій, засоби їх реалізації та очікувані результати.

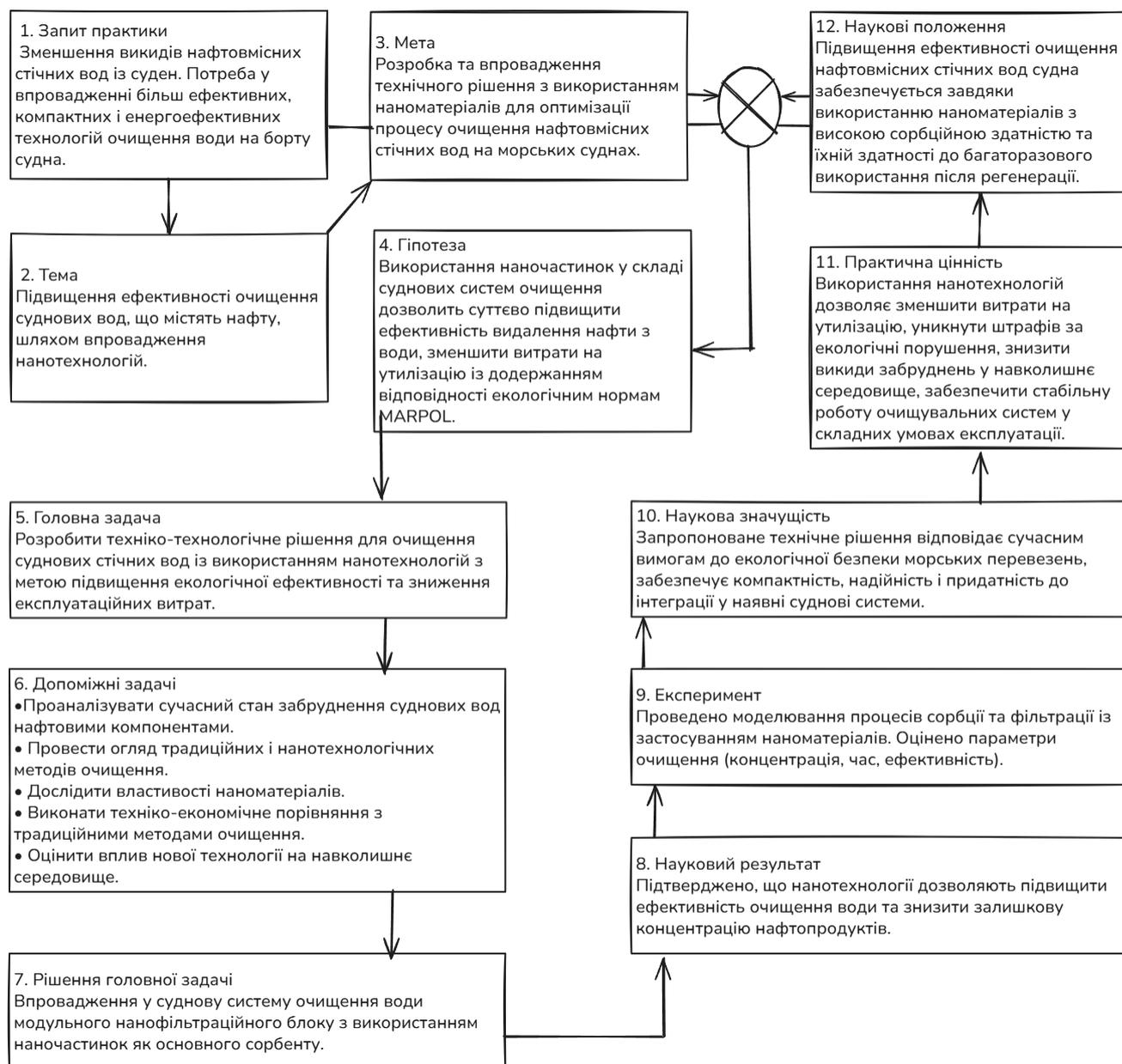


Рисунок 2.1 – Технологічна карта наукового дослідження

Метою даного дослідження є аналіз можливостей використання нанотехнологій для очищення нафтовмісних стічних вод на морських судах.

*Основні задачі дослідження включають:*

- ❖ аналіз типів нафтовмісних забруднень у суднових стічних водах;
- ❖ вивчення сучасних наноматеріалів для очищення води;
- ❖ оцінку ефективності нанотехнологій в умовах обмеженого простору судна;
- ❖ аналіз техніко-економічних аспектів впровадження нанотехнологій;

❖ розробку рекомендацій щодо впровадження найбільш ефективних рішень.

*Об'єкт дослідження* – системи очищення нафтовмісних стічних вод на морських суднах.

*Предмет дослідження* – застосування нанотехнологій для підвищення ефективності очищення суднових стічних вод.

### 2.3 Обґрунтування мети і завдань дослідження

Важливість проведення досліджень, пов'язаних з питаннями проблеми забруднення морського середовища нафтовмісними стічними водами, що утворюються під час експлуатації суден, залишається актуальною для сучасного морського транспорту. Традиційні методи очищення води (механічні, фізико-хімічні, сорбційні) не завжди забезпечують необхідний рівень очищення та стабільність роботи систем у складних умовах експлуатації суден.

Крім того, проведення подібних досліджень узгоджується з вимогами міжнародних екологічних нормативів і конвенцій щодо зниження скидів нафтовмісних вод та підвищення екологічної безпеки морських перевезень.

Зменшення шкідливих викидів і дотримання міжнародних екологічних вимог вимагають пошуку нових технічних рішень, здатних забезпечити більш глибоке очищення нафтовмісних стічних вод при мінімальних енерговитратах і компактних розмірах обладнання. Одним із перспективних напрямів є використання нанотехнологій.

Як об'єкт дослідження обрано процес очищення суднових вод, що містять нафту.

Предметом дослідження – застосування наночасток для підвищення ефективності очищення нафтовмісних суднових вод.

Актуальність теми дослідження базується на розробці та обґрунтування технічного рішення з використанням наноматеріалів для підвищення ефективності очищення нафтовмісних стічних вод морських суден.

Гіпотеза наукового дослідження полягає в тому, застосування наночастинок у складі суднових систем очищення дозволить суттєво підвищити ефективність видалення нафти з води та знизити експлуатаційні витрати.

Головне завдання магістерського дослідження полягає у визначенні найбільш техніко-технологічного рішення очищення суднових стічних .

Для вирішення головного завдання необхідне рішення ряду допоміжних завдань, а саме:

- Проаналізувати сучасний стан забруднення суднових вод нафтою.
- Провести огляд існуючих методів очищення нафтовмісних вод та визначити їх недоліки.
- Дослідити властивості наноматеріалів, придатних для фільтрації нафтопродуктів.
- Розробити концепцію нанотехнологічного модуля очищення суднових вод.
- Провести порівняння ефективності очищення.
- Визначити екологічну та економічну доцільність впровадження запропонованого рішення.
- Рішення головного завдання магістерського дослідження виконано шляхом синтезу наукових результатів рішення допоміжних завдань.

## 2.4 Висновки за розділом 2

1. В результаті вибору теми магістерського наукового дослідження за ознаками актуальності, наукової новизни та практичної значущості сформульована тема, спрямована на пошук нових шляхів підвищення ефективності очищення суднових вод, що містять нафту, шляхом застосування нанотехнологій.

2. Об'єктом дослідження обрано процес очищення суднових вод, що містять нафту.

3. Предметом дослідження є використання наночастинок для підвищення ефективності очищення нафтовмісних стічних вод суден.

4. Метою дослідження є розробка та обґрунтування технічного рішення з використанням наноматеріалів для підвищення ефективності очищення нафтовмісних стічних вод на морських судах.

5. Головне завдання магістерського наукового дослідження полягає у створенні техніко-технологічного рішення для очищення судових стічних вод із використанням наночасток, що забезпечить підвищення екологічної ефективності процесу та зниження експлуатаційних витрат.

6. Рішення головного завдання магістерського наукового дослідження виконано на основі синтезу результатів допоміжних завдань. На базі системного підходу замкнутий цикл наукового дослідження представлений у вигляді технологічної карти дослідження.

### 3 МЕТОДИ ТА ТЕХНОЛОГІЇ ОЧИЩЕННЯ НАФТОВІСНИХ СУДНОВИХ ВОД

Забруднення Світового океану нафтою та нафтопродуктами – одна з глобальних екологічних проблем. Нафта являє собою в'язку маслянисту рідину, що має темно-коричневий колір та володіє слабкою флуоресценцією. Лляльна вода – це вода, що утворюється на судах або кораблях, у якій присутні домішки нафтопродуктів та яка накопичується у ллялах машинних відділень. Лляльні води машинного відділення включають дренажну або невитрачену воду з котлів, танків збору води, танків питної води та інших місць. Однак лляльні води машинного відділення включають не тільки таку чисту воду, а й дренаж з ділянок машинного відділення де знаходяться двигуни та інші механізми. Такий дренаж містить в невеликій кількості паливо, змащувальні мастила, гідравлічні рідини, розчинники і чистячі хімікати. В нашому сторіччі, у світі гостро стоїть проблема скидання лляльних вод, що містять в собі нафтопродукти. Міжнародна конвенція щодо запобігання забрудненню з суден (MARPOL 73/78) забороняє скидання забруднених нафтою сумішей, крім випадків, коли дотримуються певні умови. Для вирішення цього складного питання з'явилося суднове обладнання, призначене для відділення нафтовмісних фракцій від лляльних вод машинного відділення перед відкаткою їх за борт.

Основне призначення СЛВ - відділення нафтовмісних фракцій і інших забруднювачів, які можуть принести шкоду навколишньому середовищу. Міжнародна морська організація встановлює правила, що розробляються Комітетом Захисту Морського Середовища (КЗМС) (англ. Marine Environment Protection Committee, МЕРС). 18 липня 2003 року КЗМС прийняв нове керівництво, якому має слідувати кожне судно, побудоване після цієї дати. У цьому документі переглянуті вимоги і специфікації до обладнання очистки забруднених лляльних вод з машинних відділень суден. На рисунку 3.1 вказана спрощена схема роботи СЛВ.

Кожен СЛВ повинен очищати лляльні води машинного відділення до чистої води з вмістом нафтових залишків і будь-яких інших забруднювачів не вище рівня 15 ppm. Кожен вимірювач вмісту нафти повинен бути стійкий до зовнішніх впливів і захищений від невмілого поводження і від втручання. При кожному запуску СЛВ, вимірювач вмісту нафти потрібно включити. СЛВ повинен бути здатний видалити забруднювачі, а також нафтовмісні фракції. Деякі з забруднювачів, такі як мастило, хімічні агенти, сажа, паливо, іржа, стічні води і деякі інші можуть бути згубними для океанської середовища. Сучасні СЛВ керуються вимірювачами вмісту нафти, обладнаними попереджувальними сигналами і автоматично закриваються пристроями, що активуються в разі перевищення вмісту нафти в відкачуваній за борт воді вище допустимого ліміту. [3]

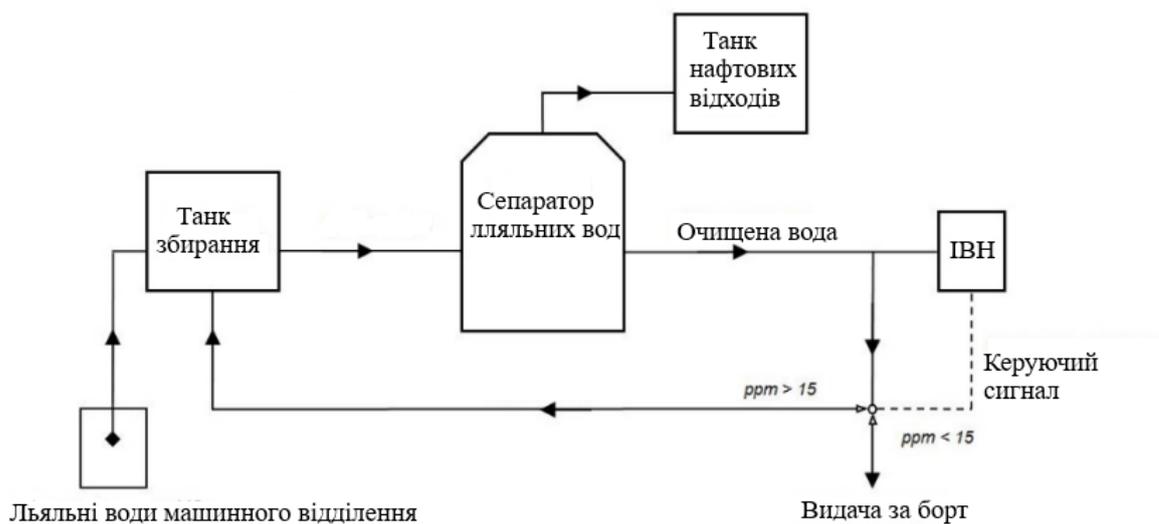


Рисунок 3.1 – Спрощена схема роботи СЛВ [9]

### 3.1 Фізичні методи очищення нафтовмісних вод

Фізичні методи очищення нафтовмісних вод, зокрема лляльної води на судах, становлять важливий етап у системі комплексного нейтралізаційного очищення від нафтопродуктів. Ці методи орієнтовані на вилучення нафтових компонентів, які накопичуються внаслідок експлуатації судових енергетичних установок, систем змащування, а також при транспортуванні нафтових вантажів або під час аварійних ситуацій. Характерною особливістю механічного очищення

є його простота, енергоефективність і доступність у реалізації. Проте, фізичні методи мають суттєві обмеження, низьку ефективність при наявності малих частинок, стабільних емульсій та розчинених органічних речовин.

У вимогах міжнародних екологічних стандартів, Конвенції MARPOL (Annex I), що встановлює концентрацію нафтопродуктів на рівні 15 ppm, тому застосування лише фізичних методів не дозволяє досягти необхідного ступеня очищення. Цей метод використовуються як первинний, підготовчий етап перед більш ефективними методами – хімічними, фізико-хімічними чи біологічними. Застосування фізичних методів очищення також відіграє важливу роль у зниженні навантаження на наступні технологічні стадії та продовженні терміну служби фільтраційного чи абсорбційного обладнання.

Фізичні методи передбачають використання механічних сепараторів (МС). У МС дрібні краплі нафти стикаються та прилипають до інших речовин у сепараторах. Формуються більші краплі, які можуть бути відокремлені завдяки плавучості через різницю в густині [3,10].

МС часто використовуються для очищення стічних вод з нафтою через обмеженість простору. Сепаратори мають компактну конструкцію, тривалий термін служби, забезпечують ефективне розділення рідкої фази та потребують мінімальної кількості додаткових хімікатів [11]. Поширені типи сепараторів включають пластинчасті, наповнювальні, фільтруючі сепаратори та волокнисті. Новий волокнистий сепаратор представлений на рисунку 3.2. Він здатен знизити вміст нафтопродуктів у воді, з 1200 до 25 мг/л за часу перебування 180 с і перепаду тиску 30 psi. Процес сепарації в цьому обладнанні візуалізовано через чотири етапи: приєднання, проходження, злиття та відокремлення [12].

Вибір відповідного сепаратора залежить від умов експлуатації та розміру емульгованих крапель нафтопродуктів. Пластинчасті та наповнювальні сепаратори використовуються для відокремлення емульгованої нафти з розміром крапель понад 20 мкм, тоді як фільтрувальні сепаратори та волокнисті сепаратори застосовуються для крапель розміром менше 10 мкм [13]. У суворих умовах, таких як морські судна, волокнисті сепаратори є непогані, оскільки вони витримують

різкі умови, такі як раптове скидання тиску та газу, коливання потоку та стічні води з високим вмістом мулу [14].

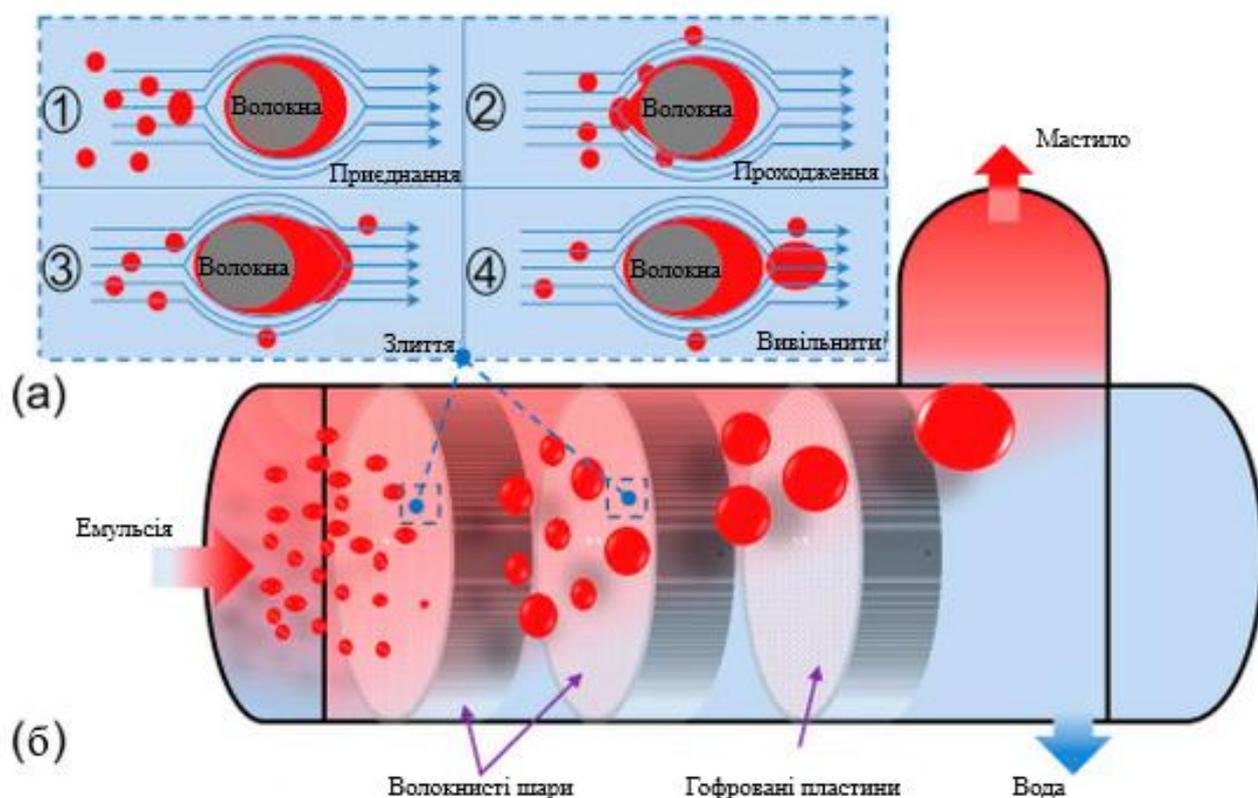


Рисунок 3.2 –Конструкція коалесцера з використанням волокнистих шарів [15]: (а) процес поділу коагулятора розділений на чотири фази (1) приєднують (2) проходження (3) злиття і (4) вивільняють; (б) структура коалесцера

Звичайні волокнисті сепаратори працюють у три етапи: спочатку волокна захоплюють емульговані краплі, коли вони проходять через волокна; потім дрібні емульговані краплі постійно стикаються одна з одною, утворюючи більші краплі; і, нарешті, великі краплі відокремлюються від волокон, коли сила між краплею та волокнами дестабілізується за допомогою гідродинамічних сил [16]. Принцип видалення нафти у волокнистих сепараторів базується на законі Стокса [17]. Матеріал конструкції волокнистих коалесцерів повинен мати високу поглинальну здатність нафти, але поглинені частинки нафти не повинні надмірно розподілятися по поверхні матеріалу. Обробка стічних вод з нафтового середовища за допомогою модифікованого керамічного волокнистого сепаратора, встановленого в

обладнанні з внутрішньою циркуляцією, інтегрованому з флокуляційно-осадочним резервуаром і багатоступневими фільтраційними шарами, показала ефективність відокремлення нафти на рівні 78,9% [18].

У фільтрувальних сепараторах важливими факторами є висока взаємодія поверхні та низька сила опору для забезпечення ефективної фільтрації. Переваги використання фільтрувальних сепараторів включають низьку вартість, простоту експлуатації та селективне відокремлення води та нафти, принципова схема зображена на рисунку 3.3.

*Відстоювання* – це один із найпростіших та найдавніших методів механічного очищення, який базується на різниці густини між водою та емульсією. У результаті цієї різниці легкі нафтові компоненти спливають на поверхню, тоді як важкі механічні домішки осідають на дно резервуара. У суднових умовах відстоювання зазвичай відбувається в спеціальних відстійниках або лляльних танках, де вода утримується в стані спокою протягом визначеного часу.

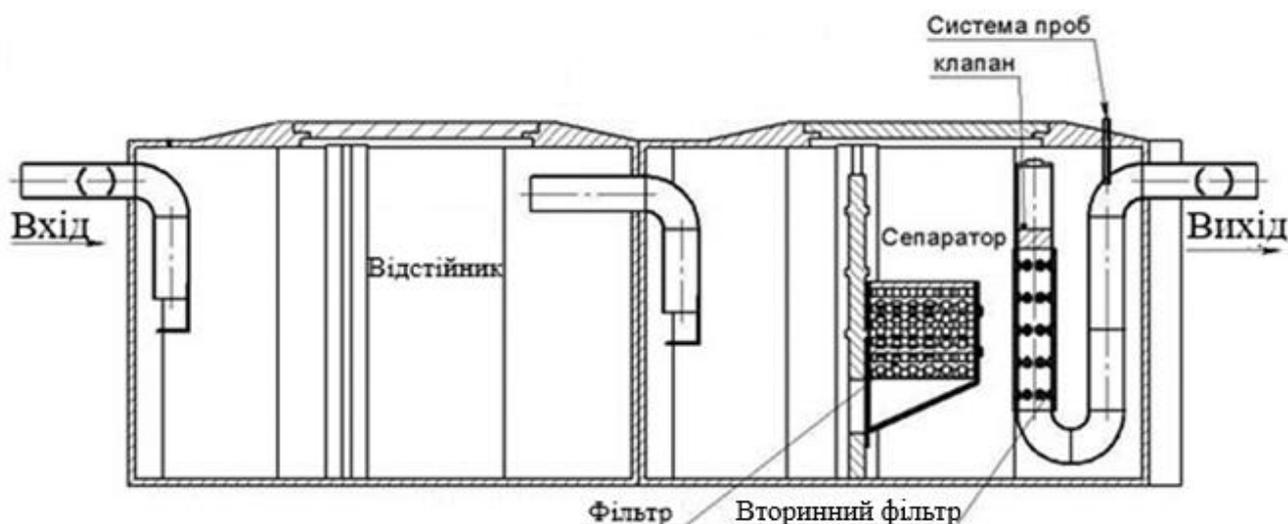


Рисунок 3.3 – Загальна схема очищення лляльних вод [19]

Цей метод доцільно застосовувати як підготовчий етап перед більш детальною очисткою. Він не дозволяє досягти повної відповідності екологічним нормам, тому майже ніколи не використовується як єдиний спосіб очищення. Відстоювання

потребує достатньо великого об'єму обладнання та часу, що обмежує його ефективність у динамічних експлуатаційних умовах судна.

*Центрифугування* – є методом, що забезпечує високий ступінь очищення завдяки дії відцентрових сил. На рисунку 3.4 видно, як у спеціальних центрифугах забруднені нафтовмісні води обертаються з великою швидкістю, унаслідок чого компоненти з різною густиною розділяються. Центрифугування особливо ефективно у випадках, коли вода містить емульговані нафтопродукти або важкі домішки, які важко видалити звичайним відстоюванням [10,20,22].

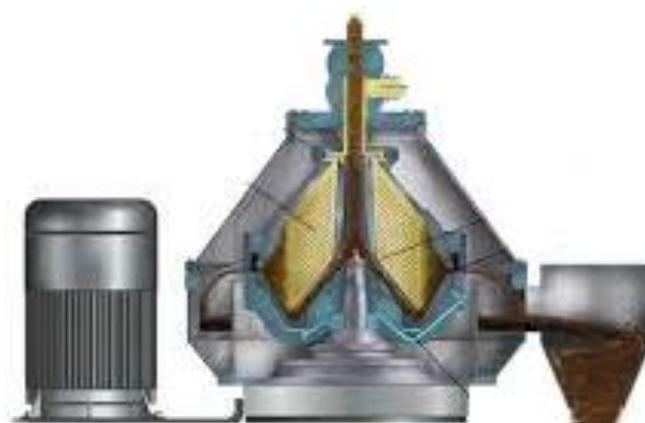


Рисунок 3.4 – Загальний вигляд відцентрового сепаратору [22]

*Фільтрування* – є завершальним етапом механічного очищення, націленим на видалення дрібних твердих частинок і залишкових забруднень. Суть процесу полягає в проходженні води через фільтрувальні матеріали, що затримують механічні домішки на поверхні. Залежно від типу забруднень і необхідного ступеня очищення, використовують два основні класи фільтрів:

- ❖ Зернисті фільтри – містять наповнювач із піску, кварцу, антрациту тощо;
- ❖ Мікрофільтри – з дрібнопористих або волоконних матеріалів.

Фільтрування ефективно при концентрації нафтопродуктів, яка вже знижена іншими методами, і може забезпечити досягнення нормативних показників, встановлених MARPOL [10].

### 3.2 Фізико-хімічні методи очищення

Для осадження нафтопродуктів у вигляді нерозчинних неутилізованих осадів використовують хімічні методи, які базуються на внесенні в забруднену воду дорогих хімічних реагентів (коагулянтів і флокулянтів), які, у свою чергу, можуть стати причиною вторинного забруднення води, яку очищують [3].

Гравітаційне розділення (ГР) та флотація розчиненим повітрям (ФРП) належать до фізичних методів очищення нафтовмісних стічних вод. Система ГР базується на різниці густин між нафтою та водою. Для ефективного розділення необхідна значна різниця в густині між цими двома фазами [3,23]. Наразі ГР використовується як перший етап розділення нафтопродуктів, але цей метод не застосовується для видалення емульгованих нафтопродуктів [3,20,24]. У 1990-х роках було проведено численні дослідження для оцінки ефективності гравітаційних сепараторів у випадках розливів нафти. Ці дослідження зосереджувалися на ефективності сепараторів після впливу вивітрювання на нафтові плями, математичному моделюванні механізмів роботи сепараторів та розробці конструкцій сепараторів для забезпечення простоти експлуатації при змінних характеристиках рідин і умовах роботи. ГР є простою системою, але має недоліки, таких як обмежена розділювальна здатність, потреба у великій площі для встановлення та складність управління й експлуатації [25-26]. Через це з 2018 року до сьогодні не було зафіксовано значної кількості досліджень, присвячених розвитку цієї системи.

Принцип ФРП полягає у введенні повітря під тиском у нижню частину відкритого резервуара. Піднімаючись до поверхні, повітряні потоки захоплюють нафтопродукти. Концепція прилипання забруднювачів до повітряних потоків проілюстрована на рисунку 3.5. Традиційна ФРП генерує мікробульбашки розміром від 20 до 100 мкм. Ці мікробульбашки прилипають до крапель нафтопродуктів, підвищуючи їхню плавучість і сприяючи руху вгору. У процесі ФРП важливими параметрами є тиск і насичення повітря у стічних водах. Для

генерації мікробульбашок і їхнього підйому на поверхню тиск має бути знижений до атмосферного рівня з надлишком розчиненого газу [27].

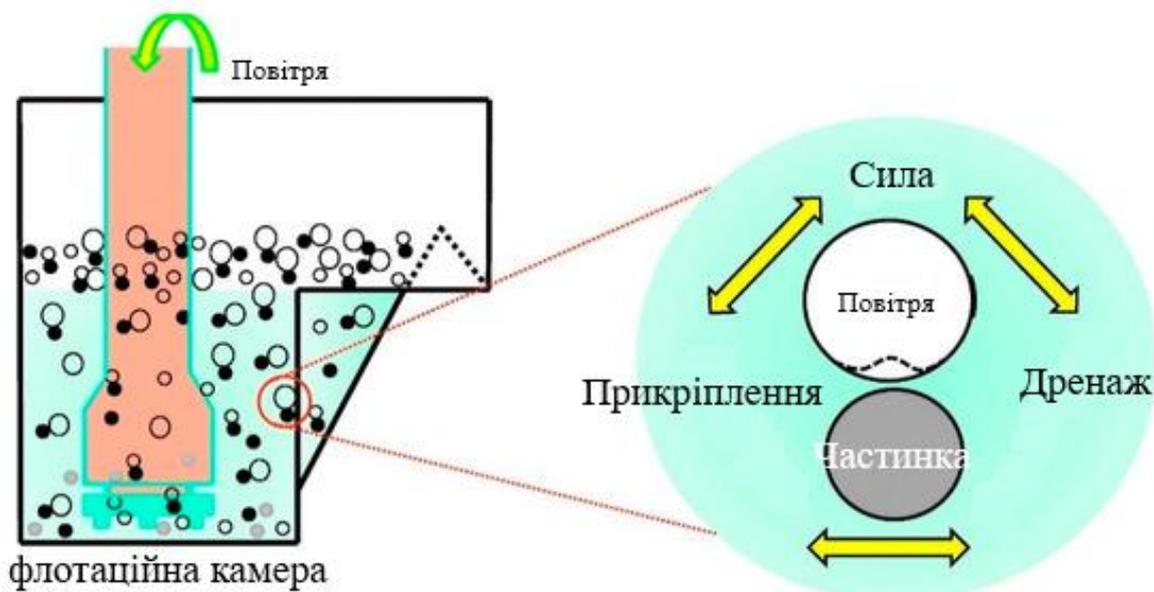


Рисунок 3.5 – Загальна схема флотації [15]

Порівняно з методом ГР, ФРП забезпечує вищу якість очищеної води, оскільки здатна видаляти емульговані нафтопродукти. Система працює з покращеним поверхневим навантаженням і потребує менших за розміром і глибиною очисних споруд, принципова схема флотаційного сепаратора зображена на рисунку 3.6. Однак цей метод має певні недоліки, зокрема високі експлуатаційні витрати через необхідність постійного генерування потоку бульбашок, особливо коли сучасні дослідження вказують на перевагу ультрадрібних бульбашок через їхню велику площу поверхні. Оскільки розмір мікробульбашок становить 20–100 мкм, а розмір емульгованих нафтопродуктів – 20 мкм і менше, мікробульбашки не можуть ефективно видаляти емульговану нафту. Для вирішення цієї проблеми була розроблена ФРП з нанобульбашками (НБ), яка продемонструвала здатність видаляти понад 90% нафтопродуктів зі стічних вод. Високі капітальні витрати на будівництво резервуарів і закупівлю насосів для генерації ультрадрібних бульбашок залишаються викликами для практичного застосування цієї системи.

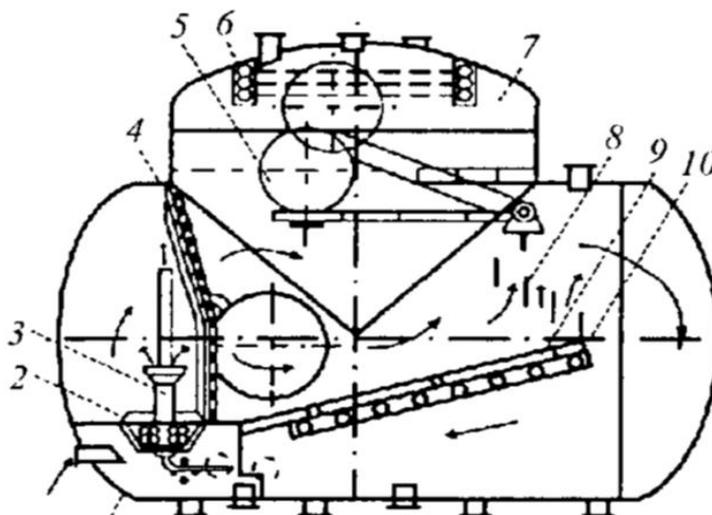


Рисунок 3.6 – Схема флотаційного сепаратору [28]:

1 – циліндричний корпус; 2, 6, 10 – підігрівальні батареї у вигляді змійовиків; 3 – сопло; 4 – сітчастий фільтр; 5 – поплавковий датчик; 7 - нафтозбірник; 8 – вертикальні перегородки; 9 – каскадна перегородка

Більшість сучасних робіт зосереджені на розробці дизайну систем ФРП та спробах зменшення поверхневого натягу нафтопродуктів шляхом додавання поверхнево-активних речовин (ПАР) до системи ФРП. Ці підходи забезпечили ефективність відокремлення нафтопродуктів на рівні понад 90%, порівняно з 50–60% у традиційних системах ФРП.

Адсорбція передбачає фізико-хімічне закріплення молекул нафтопродуктів на поверхні твердих сорбентів. Найбільш поширеними є вугілля, природні й синтетичні цеоліти, кремнезем, а також наноматеріали. Метод доцільний для доочистки стоків з низьким вмістом залишкових забруднень, оскільки забезпечує високу ефективність при малій концентрації нафтопродуктів [3,10]. Загальна схема зображена на рисунку 3.7.

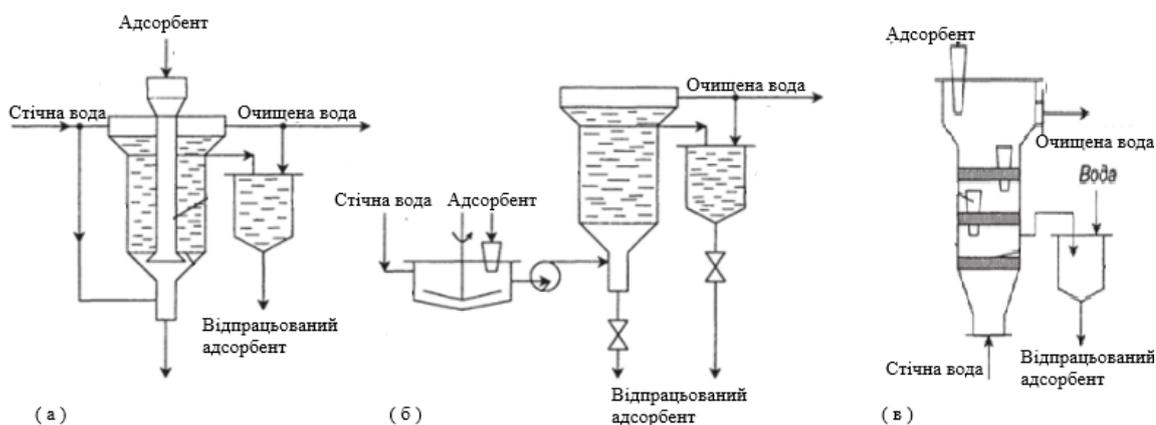


Рисунок 3.7 – Загальна схема Адсорбера [29]: *a* - циліндричний одноярусний , *б* - одноярусний з виносним змішувачем, *в* – триярусний

Коагуляція та флокуляція – це процеси дестабілізації та агрегації колоїдних і тонкодисперсних частинок шляхом додавання реагентів. Коагулянти викликають нейтралізацію зарядів частинок, тоді як флокулянти сприяють утворенню більших агрегатів, які легко осаджуються, схема очистки з коагулянтном (рис.3.8). Недоліком методу є утворення значної кількості осаду та ризик вторинного забруднення через залишки реагентів.



Рисунок 3.8 – Загальна схема очищення за допомогою коагуляції [30]

Іонний обмін застосовується для видалення розчинених компонентів, зазвичай використовуючи іонообмінні смоли. Метод є вибіркоким і особливо ефективним у комбінації з іншими способами доочищення, наприклад, після коагуляції чи флотації.

Електрохімічна коагуляція є перспективним методом, що поєднує електроліз із коагуляційним ефектом. У процесі використання анодів, виготовлених з алюмінію або заліза, в воду потрапляють іони коагулянта без додавання хімічних реагентів. Цей підхід дозволяє уникнути надмірного утворення осадів та знижує ризик вторинного забруднення.

### 3.3 Хімічні методи очищення

Для видалення із лляльних вод колоїдних і дрібнодисперсних домішок, а також важких металів, фенолів, кислот, лугів застосовують фізико-хімічні методи. Серед них найбільш уживаних методи адсорбції нафтопродуктів на поверхні сорбентів. Перевагами сорбційних методів є їхня сумісність з іншими способами збору нафтопродуктів і можливість багаторазового використання сорбенту після регенерації. Як сорбенти використовують як природні (торф, активоване вугілля, тирса, перліт, глина), так і штучні (пінополіуретан, кераміка, синтетичні волокна) пористі матеріали. Під час вибору матеріалів необхідно враховувати їхню екологічність і доступність у заданому регіоні.

Хімічні методи очищення базуються на використанні реагентів або окисників, які змінюють хімічну природу забруднювачів (рис. 3.9), що в подальшому полегшує вилучення зі стічних вод. Вони дозволяють ефективно видаляти розчинені та емульговані нафтопродукти, а також знижувати загальне хімічне та біохімічне споживання кисню у воді.

Одним з найбільш ефективних хімічних методів є озонування. Воно ґрунтується на використанні озону – сильного окисника, який забезпечує розщеплення складних органічних сполук до більш простих або до повної мінералізації з утворенням вуглекислого газу і води. Озон взаємодіє з ароматичними та ненасиченими структурами вуглеводнів, що забезпечує розрив хімічних зв'язків і руйнування забруднювальних молекул.

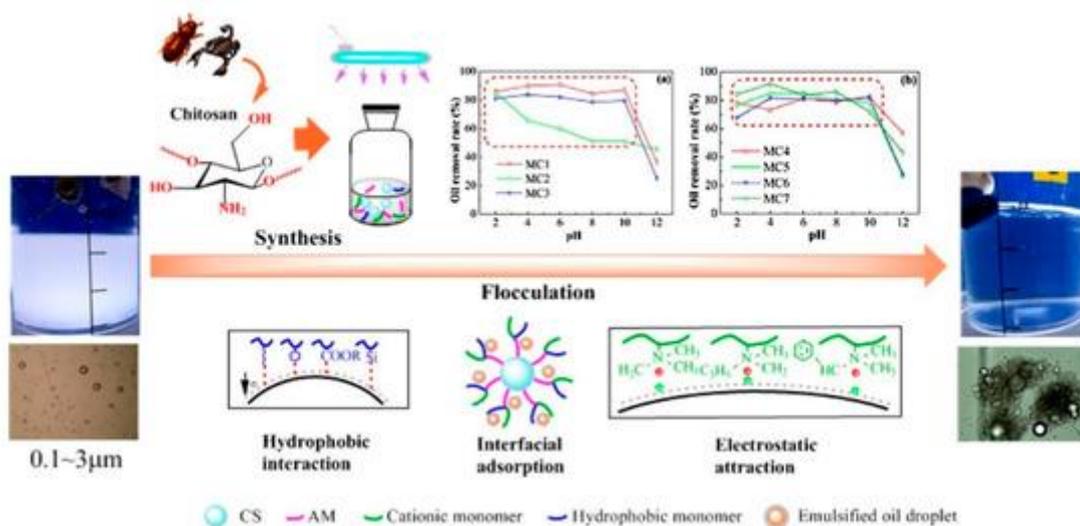


Рисунок 3.9 – Механізм флокуляції [15]

Основними перевагами озонування є висока ефективність у видаленні емульгованих нафтопродуктів, здатність до дезінфекції, а також відсутність залишкових хімічних реагентів у воді після очищення. Водночас метод потребує значних енергетичних витрат для генерації озону та використання спеціальних антикорозійних матеріалів в обладнанні через агресивність середовища.

Озонування найчастіше застосовується після фізико-хімічних процесів, оскільки дозволяє значно покращити якість очищення та забезпечити відповідність міжнародним екологічним нормам. Такий комбінований підхід є доцільним для досягнення високої ефективності очищення нафтовмісних вод.

### 3.4 Біологічні методи очищення

Біологічні методи очистки передбачають використання вуглеводнеокислювальних мікроорганізмів, які здатні засвоювати різні вуглеводи нафти як єдине джерело вуглецю. Перевагами біологічних методів є їхня ефективність, економічність, екологічна безпечність та відсутність вторинних забруднень. Біологічні методи ґрунтуються на здатності мікроорганізмів розкладати нафтові забруднювачі завдяки природних біохімічних процесів.

Звичайний БМ можна розділити на системи аеробного та анаеробного очищення. Анаеробні системи потребують менше енергії завдяки відмові від процесу аерації, можуть перетворювати органічні забруднювачі на газ метан, вимагають менше поживних речовин і виробляють менше осаду [31]. Цей процес також може давати цінні побічні продукти, такі як біорозкладні пластмаси [32]. Аеробний БМ використовується для очищення високотемпературних і високо забруднених концентрованих стічних вод завдяки прискореній кінетиці біорозкладу [33]. Однак у таких БМ-системах на мікробні клітини впливають токсичні хімічні речовини та висока солоність стічних вод, що знижує загальну ефективність системи.

Біологічні методи засновані на здатності вуглеводнеокислювальних мікроорганізмів засвоювати різні вуглеводні нафти як єдине джерело вуглецю. Перевагами біологічних методів є їхня ефективність, економічність, екологічна безпечність та відсутність вторинних забруднень. У спеціально створених умовах мікроорганізми використовують вуглеводневі сполуки як джерело енергії та вуглецю, трансформуючи їх у менш токсичні речовини або мінералізуючи до вуглекислого газу та води. Очищення водонафтових розчинів здійснюється у контрольованому середовищі (біореакторах), де підтримується необхідна концентрація активних мікроорганізмів. У процесі життєдіяльності ці мікроорганізми утилізують широкий спектр нафтопродуктів. На ефективність біоочищення впливають такі чинники, як температура, рН, наявність кисню, окисно-відновний потенціал, токсичність середовища та концентрація органічних речовин. Окиснення нафтопродуктів відбувається під дією спеціалізованих мікроорганізмів, що продукують ферменти, які розщеплюють вуглеводні та транспортують їх усередину клітин. Цей процес є основою сучасної біотехнології за допомогою мікробного метаболізму в аеробних, анаеробних або змішаних умовах. Ферментно-опосередкована біоремедіація застосовує природні ферменти мікроорганізмів або рослин для цільової деградації токсичних сполук. Завдяки високій реактивності та малій молекулярній масі ферментів, процес деградації відбувається швидко та енергоефективно.

Для подолання цієї проблеми досліджена технологія аеробної грануляції та її застосування в аеробному реакторі з гранульованим активним мулом (АРО) [34-35]. АGR більш стабільний при очищенні нафтовмісних стічних вод завдяки мікробному різноманіттю, компактній структурі гранул, гарній седиментації, високому утриманню біомаси та стабільності відносно токсичних забруднювачів. Ці якості аеробних гранул призводять до менших вимог до об'єму реактора, нижчих капітальних витрат та миттєвої здатності до видалення поживних речовин. Технологія аеробної грануляції використовується для очищення стічних вод, та ін..

Серед ефективних мікроорганізмів для біоочищення виділяють галофілів – мікроорганізми, що активно функціонують у гіперсольових умовах, дозволяючи видаляти нафтові забруднення з високомінералізованих стоків. Дослідження демонструють високу ефективність використання твердих бактеріальних агентів у двоетапному процесі біодеградації, що забезпечує понад 90 % видалення нафти та значне зниження хімічного споживання кисню навіть з високим вмістом нафтопродуктів. Випробування підтверджують перспективність цієї технології для впровадження.

Останнім часом аеробні й анаеробні системи об'єднуються для очищення нафтовмісних стічних вод без необхідності будь-якого попереднього очищення [36]. Такий підхід викликає підвищення ефективності очищення й скорочення капітальних витрат і площ, необхідних для встановлення системи очищення. БТ з використанням мембранного біореактора (МБР) і періодичного біореактора секвенування (SBR) набирає обертів у сфері нафтовмісних стічних вод із великою концентрацією органічних сполук та вуглеводнів [37-38].

Як правило, МБР виробляє високоякісні стічні води з невеликою площею та невеликим об'ємом осаду [39]. SBR демонструє надійну систему та просту роботу з широкою гнучкістю [40]. Однак комерційне застосування МБР і SBR обмежене відсутністю впевненості в їхній стабільності та надійності під час експлуатації через низку факторів, що впливають на постійну ефективність системи й продуктивність використовуваних мікроорганізмів. Проблеми, такі як забруднення мембран, модифікація біокінетики біомаси та характеристики активного мулу

через присутність у стічних водах таких сполук, як рецидивні або ксенобіотичні, не є незначними [40]. У добувній воді висока солоність може спричинити плазмоліз мікроорганізмів в активному мулі й тим самим вплинути на їхній метаболізм [41].

Таким чином, поточна дослідницька тенденція БТ передбачає методи підвищення стабільності й ефективності для виробництва більш надійного процесу. Кампо і Белла та ін. культивували аеробні гранули безпосередньо в стічних водах помиїв, які в основному містять високомолекулярні рецидивні вуглеводні, що сприяють поступовій адаптації гранул до солоності та вмісту вуглеводнів. Ці аеробні гранули призводили до більш високого видалення загальної кількості нафтових вуглеводнів (ТРН), ніж зрілі аеробні гранули, культивовані в різних середовищах [43]. Повідомлялося, що використання біоносіїв у реакторі з рухомим шаром біоплівки-MBR (MBBR-MBR) сприяє росту та стабільності нітрифікуючих і денітрифікуючих мікробів у токсичному середовищі та стічних водах із високою солоністю, що робить MBBR-MBR більш бажаним порівняно з MBR [42-43].

В інтегрованій системі недоліки кожного компонента, такі як мембранне коксування під час мембранної фільтрації, низька стабільність мікробних клітин у сполуках біорецидиванта та потреба у високій сукупній потребі в енергії для фотокаталітичної реакції, були подолані іншим компонентом.

Біологічні методи очищення мають переваги – екологічність, низьку собівартість, можливість адаптації до різних умов забруднення. Проте їх застосування обмежується чутливістю мікроорганізмів до токсичних домішок, тривалістю процесу обробки та потребою у значних просторових ресурсах для розміщення біореакторів [3,10].

### 3.5 Мембранні системи та ультразвукове очищення

Мембранні технології очищення нафтовмісних вод базуються на принципі пропускання води крізь мембрани, які затримують домішки, включаючи нафтові сполуки, дрібні частинки, солі та органічні забруднення (рис. 3.10). Найпоширенішими є процеси ультрафільтрації, мікрофільтрації, що відрізняються

діаметром пор мембрани та тиском, за якого здійснюється фільтрація. Ультрафільтрація ефективно видаляє часткову та емульговану нафту.

Мікрохвильове опромінення може бути використане для деемульгації нафти у стічних водах на основі двох миттєвих механізмів;

Перший – це швидке збільшення температури крапель нафти через молекулярне тертя та обертання, що призводить до зниження в'язкості емульсії та таким чином руйнує зовнішню плівку краплі.

Другий – це молекулярне обертання, що нейтралізує дзета-потенціал через реорганізацію електричних зарядів навколо молекул води, що призводить до руху іонів навколо крапель. Переваги цього методу включають відсутність використання хімікатів, що виключає вторинне очищення для видалення цих хімічних речовин. Цей метод є екологічно чистим.

Очищення стічних вод за допомогою ультразвуку виявилось дуже ефективним після інтеграції з електрохімічною коагуляцією. Ультразвук зменшує утворення щільних шарів на поверхнях електродів та глибину розтягування подвійного електричного шару на металевих поверхнях. Він також активує іони в зоні реакції навколо електродів та активує поверхню електрода, створюючи дефекти в кристалічній решітці електродів.

Комбіновані мембранні установки дозволяють поєднувати кілька типів фільтрації в одному технологічному циклі, підвищуючи ефективність очищення. Такі системи особливо ефективні у ступеневому вилученні як великих частинок, так і розчинених речовин, включаючи вуглеводні, пари та інші органічні домішки. Мембранні методи не потребують застосування хімічних реагентів, що знижує ризик утворення токсичних побічних продуктів і мінімізує екологічне навантаження.

MST можна спочатку розділити на три категорії залежно від рушійної сили, що використовується для розділення: з приводом від тиску, з осмотичним приводом і з термічним приводом. Серед цих трьох рушійних сил найбільш популярною категорією, яка використовується для очищення нафтовмісних стічних вод, є керована тиском [44]. Мембрану, керовану тиском, можна додатково

класифікувати на зворотний осмос (RO), нанофільтрацію (NF), ультрафільтрацію (UF) та мікрофільтрацію (MF). Раніше повідомлялося про процеси мікрофільтрації та ультрафільтрації для очищення нафтовмісних стічних вод, причому переважним методом є УФ, оскільки це операція низького тиску і, відповідно, вимагає низьких капітальних та експлуатаційних витрат [45].

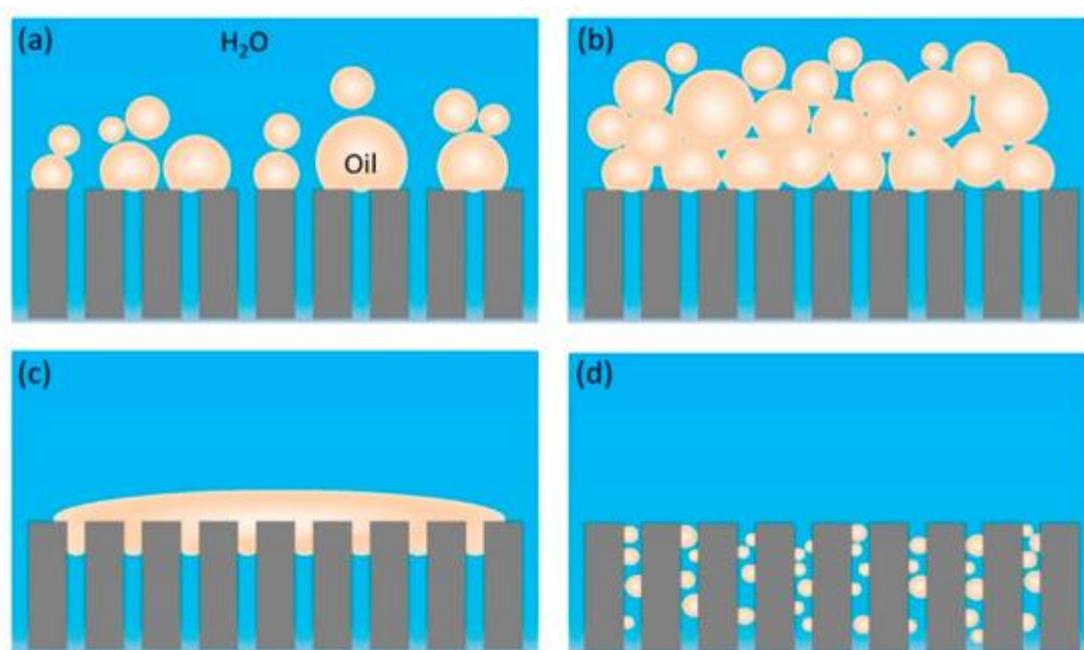


Рисунок 3.10 – Принципова схема роботи мембранної технології [15]:

- (a) Частинки нафтопродуктів частково блокують пори мембрани;
- (b) Утворення шару осаду на мембрані;
- (c) Утворення безперервної нафтового шару на мембрані;
- (d) Нафто частинки всередині пор мембрани.

Застосування ультразвуку як допоміжного методу очищення ґрунтується на явищі акустичної кавітації у рідині під дією високочастотних хвиль. Цей процес сприяє диспергуванню емульгованих нафтопродуктів, руйнуванню стабілізуючих оболонок колоїдів та активізації сорбційних і флокуляційних процесів. Ультразвукове очищення часто використовується у комбінації з іншими фізико-хімічними або біологічними методами.

Однак для практичного застосування основними проблемами, з якими стикаються ці мембрани, є погана довготривала стабільність, забруднення і короткий термін служби мембрани [46]. Краплі олії можуть збиратися на поверхні мембрани або всередині порових каналів, які потім блокують проникнення води через мембрану при постійному трансмембранному тиску (ТМТ). Ця проблема більш помітна в гідрофобній полімерній мембрані. Щоб вирішити цю проблему, очищення здійснюється шляхом зворотної промивки, хімічного очищення і промивання повітрям для підтримання працездатності мембрани, але було виявлено, що процес очищення скорочує термін служби мембрани [47]. Очищення також збільшує експлуатаційні витрати MST.

Термічно керований MST, відомий як мембранна дистиляція (MD), широко вивчався під час очищення солоної води, але останнім часом з'явився дослідницький інтерес до використання цього підходу для розділення нафтовмісних стічних вод. Досліджувалася мембранна дистиляція прямого контакту для очищення стічних вод суден [48]. Основною проблемою під час застосування цього методу при розділенні нафтовмісних стічних вод є мембранне змочування, коли нафтопродукти починають проникати в пори мембрани. Омніфобні мембрани, які можуть відштовхувати рідину з високим і низьким поверхневим натягом і залишатися незмочуваними у системах розділення нафтовмісних стічних вод, ретельно досліджуються для вирішення цієї проблеми.

Серед переваг мембранних і ультразвукових технологій варто відзначити високу ефективність очищення, компактність обладнання, можливість автоматизації процесу та мінімізацію утворення осадів.

### 3.6 Висновки за розділом 3

1. Проведена аналогія показала, що механічні методи, зокрема відстоювання, сепарація, центрифугування та фільтрування, є доцільними на початкових етапах і дозволяють вилучати великі нафтові частинки, однак не завжди забезпечують досягнення нормативних показників очищення 15 ppm.

2. Фізико-хімічні методи та хімічні, характеризуються високою ефективністю та можливістю розщеплення емульсій, при цьому механічні виділяються відсутністю потреби у реагентах, що знижує вторинне забруднення. Хімічні методи, зокрема озонування, демонструють найвищу ефективність у руйнуванні різноманітних сполук, проте мають суттєвий недолік, висока енергоємність процесу та потреба у корозійностійкому обладнанні.

3. Біологічні технології очищення, аеробні гранули, мембранні біореактори (MBR) та комбіновані установки, відзначаються екологічністю, високим ступенем очищення понад 90 %, однак є недоліки - тривалість процесу, чутливість мікроорганізмів до токсичних компонентів.

4. Мембранні технології можуть включаючи ультрафільтрацію та нанофільтрацію, забезпечують найглибше доочищення без використання реагентів, великою проблемою є забруднення мембран і високими експлуатаційними витратами.

5. Проведене порівняння показало жоден з методів не є універсальним, а найвищої ефективності можна досягти лише за умов їх комбінованого використання, що дозволяє не тільки забезпечити відповідність міжнародним екологічним стандартам MARPOL 73/78, а й мінімізувати на 80% вплив на морське середовище.

## 4 АНАЛІЗ ПРОЦЕСІВ ОЧИЩЕННЯ ДЛЯ ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ

### 4.1 Основні фактори, що впливають на ефективність очищення

Очищення нафтовмісних стічних вод є однією з ключових екологічних та технічних проблем сучасного судноплавства й промисловості. Високий рівень техногенного навантаження, інтенсивне використання нафтопродуктів та постійне зростання обсягів морських перевезень зумовлюють необхідність застосування ефективних систем обробки стічних вод, що відповідають міжнародним вимогам Конвенції MARPOL. При цьому практичний досвід свідчить: універсальної технології, здатної забезпечити високу ефективність за будь-яких умов, не існує. Кожен метод має власні переваги та обмеження, що визначають сферу його доцільного використання.

Ефективність очищення залежить не лише від принципів дії системи, а й від комплексу фізико-хімічних та біологічних чинників. Ключову роль відіграють концентрація нафтопродуктів, температура, наявність диспергованих твердих частинок, в'язкість і щільність нафтозабруднень. Водночас тип обраної технології визначає її чутливість до цих факторів: фізичні методи, як-от флотація чи гравітаційне розділення, малоефективні при наявності емульгованих вуглеводнів; хімічні методи – коагуляція, сорбція, окиснення – вимагають точного дозування реагентів і можуть спричиняти утворення вторинних забруднень; біологічні підходи базуються на активності мікроорганізмів, що робить їх надзвичайно чутливими до змін середовища.

Особливе значення мають експлуатаційні параметри: час обробки, рівень турбулентності й механічного змішування, домішок, серед яких часто зустрічаються поверхнево-активні речовини й важкі метали. Ці чинники можуть знижувати ефективність навіть сучасних технологій, якщо вони не враховані під час проектування системи. Саме тому нині активно досліджуються комбіновані та інтегровані методи, що поєднують переваги різних підходів і компенсують їхні недоліки.

З технічної точки зору, сучасний арсенал технологій охоплює широкий діапазон – від традиційних механічних і фізико-хімічних методів до високотехнологічних рішень, таких як мембранні системи, ультразвукове очищення та нанотехнології. Перші відзначаються простотою та відносно низькою вартістю, проте здебільшого не забезпечують глибокого очищення. Натомість другі потребують більших енергетичних і фінансових витрат, проте здатні досягати рівня очищення, що відповідає найсуворішим стандартам.

Таким чином, на сучасному етапі розвитку технологій очищення постає необхідність системного аналізу існуючих методів із позиції їхньої ефективності, економічності, екологічної безпеки та придатності до впровадження у специфічних умовах судноплавства. Проведення такого аналізу дозволяє сформувати наукове підґрунтя для розробки інтегрованих рішень, які поєднують у собі високу екологічну ефективність, технологічну надійність і відповідність міжнародним вимогам.

#### 4.2 Порівняння різних технологій видалення нафти з води

У сфері очищення нафтовмісних стічних вод застосовується широкий спектр технологій, кожна з яких має власні конструктивні особливості, принципи дії та сферу ефективності. Слід підкреслити, що жоден метод не є універсальним: як для базового очищення, так і високотехнологічні та енергоємні установки, здатні забезпечувати очистку до міжнародних екологічних стандартів (рис. 4.1).

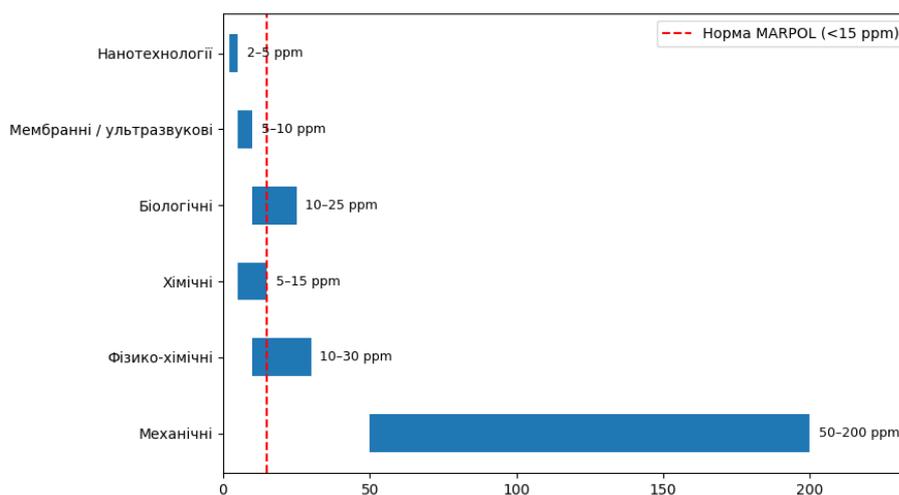


Рисунок 4.1 – Порівняння методів очищення за залишковою концентрацією (ppm)

### 4.3 Використання нанотехнологій для очищення нафтовмісних стічних вод на суднах

Забруднення нафтовими частинками, що утворюються під час експлуатації суден, становить серйозну екологічну проблему, оскільки навіть незначні кількості нафтопродуктів у воді негативно впливають на морські екосистеми та ускладнюють процеси природного самоочищення. Традиційні методи очищення, не завжди забезпечують достатню ефективність при низьких концентраціях нафтопродуктів або у випадках стабільних емульсій. Тому впровадження нанотехнологій дозволяє суттєво підвищити ефективність очищення за рахунок унікальних властивостей наноматеріалів.

Наноматеріали характеризуються великою питомою поверхнею, високою хімічною та термічною стабільністю, а також розвинутою реакційною здатністю, що дає змогу ефективно адсорбувати та розкласти органічні забруднювачі нафтового походження, зображення наноматеріалів, під мікроскопом, рисунок 4.2. Застосування наночастинок у системах очищення нафтовмісних вод на суднах забезпечує не лише глибоке очищення, а й скорочення розмірів і маси обладнання, що має особливе значення для морського транспорту.

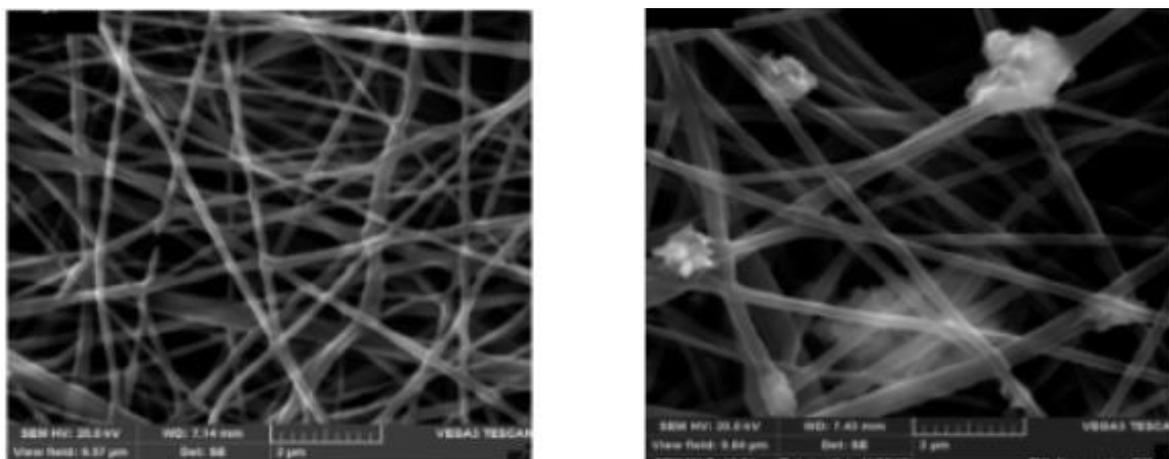


Рисунок 4.2 – Зображення нановолокон (а) та наночастинок (б) [49]

Основним процесом, який широко використовується у нанотехнологічних системах очищення, є адсорбція. Це поверхнєве явище, при якому молекули нафтопродуктів, розчинені або емульговані у воді, переходять на поверхню твердого адсорбенту. Використання наночасткових сорбентів значно підвищує ефективність цього процесу завдяки збільшенню активної площі взаємодії та можливості модифікації поверхні.

Магнітні наночастинки представляють собою інноваційний клас матеріалів, які знайшли широке застосування у очищенні стічних вод завдяки своїм унікальним властивостям (рис. 4.3). Їхня висока питома поверхня та малий розмір забезпечують ефективну взаємодію з забруднювачами, включно з нафтопродуктами, що робить можливим їх видалення. Магнітні властивості таких частинок дозволяють використовувати магнітне поле для відділення забруднювача разом із адсорбентом із водного середовища, що значно спрощує процес регенерації та повторного використання наноматеріалу. На судах це особливо важливо, оскільки необхідно мінімізувати об'єм обладнання та енерговитрати на очищення, зберігаючи при цьому високу ефективність видалення нафтових сполук.

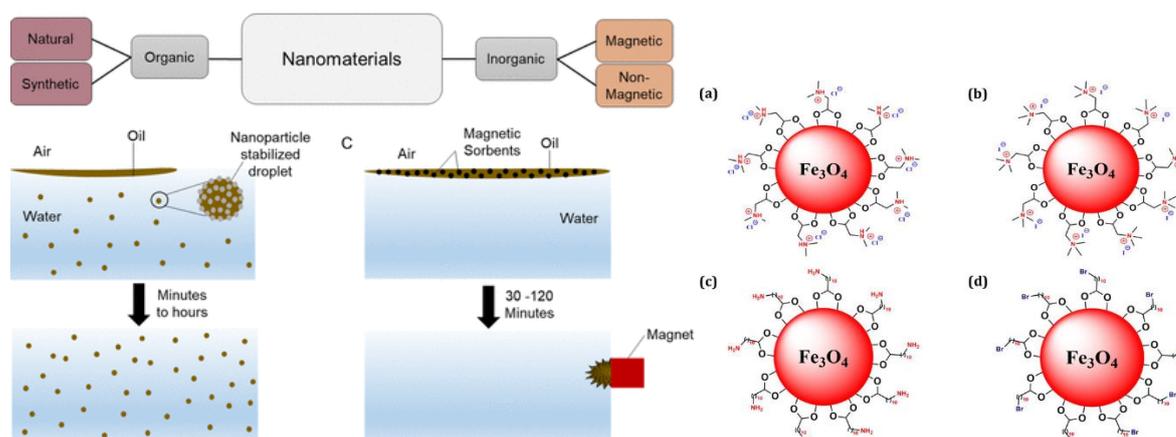


Рисунок 4.3 – Ліквідації нафти/мастила, загальний вигляд за допомогою магнітних наночастинок [50-51]

Магнітні наночастинки  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  демонструють різні типи магнітної поведінки, зокрема суперпарамагнітну та феримагнітну. У присутності зовнішнього магнітного поля матеріал намагнічується і досягає максимального значення

намагніченості, яке називається насиченою намагніченістю. Для феримагнітних наночастинок також визначаються коерцитивна сила та залишкова намагніченість, що показує, наскільки складно розмагнітити матеріал та наскільки він зберігає намагніченість без зовнішнього поля. Суперпарамагнітні частинки не проявляють магнітних властивостей без прикладеного поля, однак реагують на нього чутливо, що запобігає їх агломерації та дозволяє дистанційно керувати частинками за допомогою магнітного поля.

На нанорівні магнітні властивості  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  наночастинок залежать від розміру, форми, кристалічності та властивостей поверхні. Ці характеристики формуються під час синтезу, зокрема від вибору метала, поверхнево-активних речовин, відновників та розчинників. Вибір відповідного методу синтезу має критичне значення для забезпечення необхідних магнітних властивостей наночастинок, що особливо важливо для їх застосування в технологіях очищення стічних вод на судах.

Суперпарамагнітне та феримагнітне поведіння  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  наночастинок визначається їх розміром. Існують два ключові розміри: суперпарамагнітний розмір та однодоменний розмір, які приблизно відповідають 20–30 нм та 80 нм відповідно. При розмірах менших за суперпарамагнітний межовий, теплова енергія перевищує енергію анізотропії, і наночастинки стають суперпарамагнітними, тобто їх намагніченість дорівнює нулю без зовнішнього поля. Однодоменний розмір визначає момент, коли частинка може самостійно формувати кілька магнітних доменів, що призводить до зменшення коерцитивної сили при збільшенні розміру.

На магнітні властивості наночастинок впливають чотири основні фактори: ефект кінцевого розміру, поверхневі ефекти, магнітна анізотропія та ступінь кристалічності. Ефект кінцевого розміру проявляється у формуванні суперпарамагнітного або однодоменного стану. Поверхневі ефекти пов'язані зі збільшенням частки атомів на поверхні, що змінює намагніченість через неспорядковані спіни та поверхневі шари. Магнітна анізотропія описує спрямовану залежність магнітного моменту і враховує анізотропію кристалічної решітки та форму частинок. Кристалічність безпосередньо впливає на максимальну намагніченість та стабільність магнітних властивостей.

Вуглецеві наноматеріали, такі як вуглецеві нанотрубки, оксид графену та активоване вугілля, відіграють ключову роль у адсорбції нафтових забруднювачів. Їх пориста структура, велика питома поверхня та можливість функціоналізації хімічними групами дозволяють ефективно зв'язувати вуглеводні та продукти переробки нафти (рис. 4.4). Активоване вугілля залишається стандартним адсорбентом завдяки універсальності та стабільності своїх властивостей. Водночас біовугілля розглядається як економічно вигідна альтернатива з нижчою вартістю виробництва та аналогічною адсорбційною здатністю. Наноструктуровані форми графену, включно з відновленим та окисленим оксидом графену, надають додаткові можливості для селективного захоплення нафтових сполук завдяки наявності функціональних груп, здатних утворювати слабкі хімічні зв'язки з вуглеводнями.

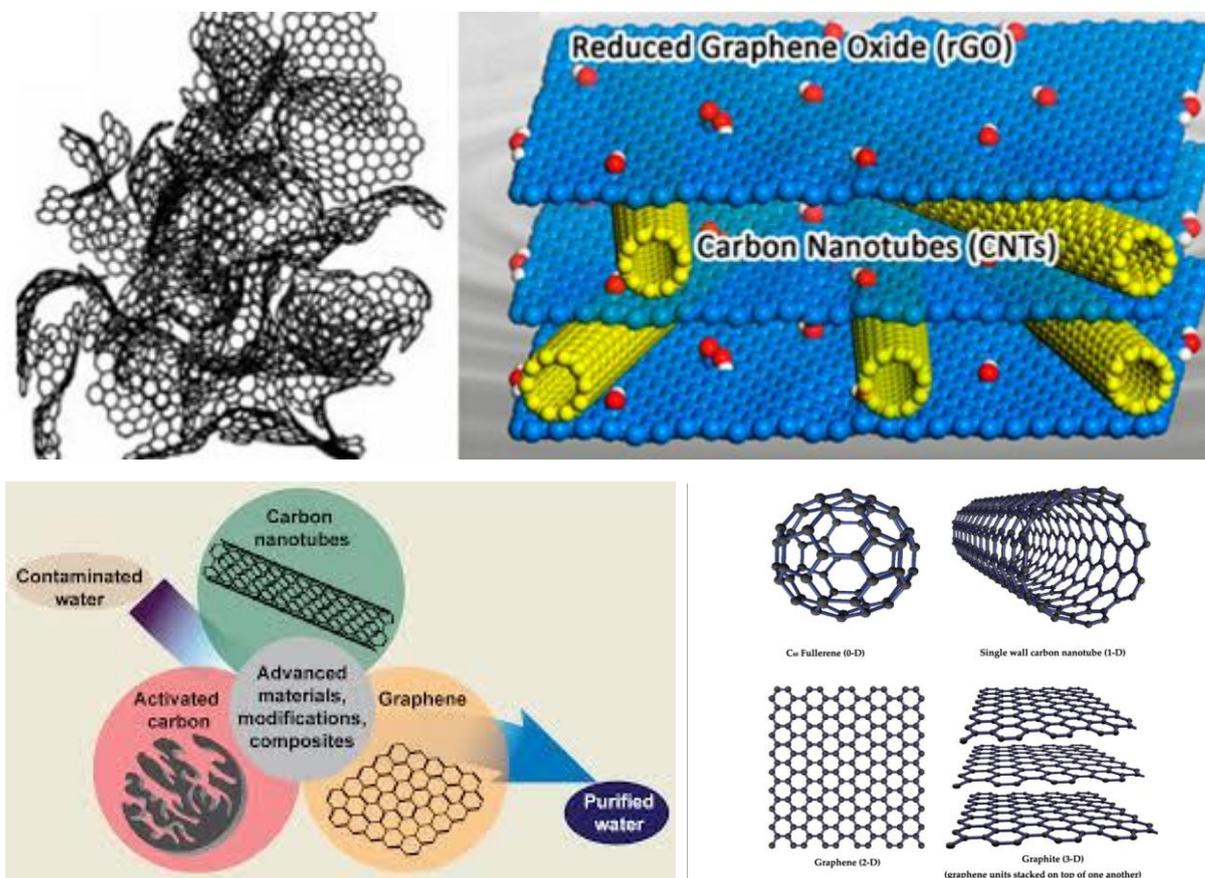


Рисунок 4.4 – Активоване вугілля, вуглецеві нанотрубки та графен: матеріали та композити для вдосконаленого очищення води [52-54]

За останні п'ять років вуглецеві наноматеріали досягли значних успіхів, розширивши традиційні межі їх застосування та відкривши нові напрями у технологіях очищення води. Одним із ключових досягнень стали інноваційні гетероструктури, такі як нанотрубки CNT@MoS<sub>2</sub>, які демонструють підвищену стабільність та частоту коливань, що робить їх перспективними для високопродуктивних систем очистки води та наномеханічних пристроїв [55].

Особливе значення для очищення нафтовмісних стічних вод на суднах мають вуглецеві нанотрубки (CNT), оксид графену (GO) та активоване вугілля, завдяки їхній великій площі поверхні, хімічно активним групам та здатності до селективної адсорбції органічних та нафтопродуктів. CNT, у свою чергу, забезпечують високу механічну міцність і термостійкість, що дозволяє використовувати їх у складних гетероструктурах і багат шарових системах, таких як DWCNT та MWCNT, для створення адсорбційних та каталізаторних нанопристроїв на борту суден.

Дослідження показали, що DWCNT здатні до термічно керованого обертання, що відкриває можливості для створення динамічних адсорбційних систем, де нанотрубки під дією теплових градієнтів можуть активніше взаємодіяти з нафтовмісними домішками. Вплив кривизни, дефектів та взаємодії шарів на кінетичні характеристики таких систем дозволяє оптимізувати адсорбційну ефективність та спрямованість процесів видалення нафтопродуктів із стічних вод.

Нові структури, включно з BP/CNT@polyureole (PPy) core-shell та тришаровими CNT, демонструють підвищену стабільність при високих температурах і тривалий ресурс експлуатації, що особливо важливо для морських умов. Використання таких композитів дозволяє значно підвищити адсорбційні властивості та зменшити втрати активного матеріалу під час циклічної обробки стічних вод [56].

Іншим важливим напрямом є модифікація CNT та графенових наноматеріалів через легування бором або азотом, функціоналізацію аміногрупами та гетероатомну інтеграцію, що покращує селективність адсорбції нафтових компонентів і стабільність структур у водних розчинах. Гетероструктурні нанотрубки, такі як CNT@MoS<sub>2</sub> або BPNT@CNT, дозволяють комбінувати

механічну міцність та електрохімічну активність, що відкриває перспективи для розробки високопродуктивних систем очистки нафтовмісних стічних вод на суднах.

Сучасні дослідження також показують, що багаторівнева самоорганізація графенових та фосфоренових наноструктур дозволяє створювати нанопори з високою специфічною площею поверхні, що значно підвищує ефективність сорбції нафтопродуктів. Водночас контрольоване введення дефектів у нанотрубки та графенові ріббони дозволяє тонко налаштовувати їх електронні та адсорбційні властивості для підвищення швидкості і селективності очищення.

Ці розробки демонструють величезний потенціал вуглецевих наноматеріалів для практичного використання на морському транспорті, де обмежений простір і постійна потреба в повторному використанні стічних вод вимагають компактних, високоефективних та стійких адсорбційних систем. Використання нанотрубок, композитів та графенових структур у поєднанні з магнітними або термічно керованими механізмами відкриває шлях до створення інтегрованих модулів очищення нафтовмісних стічних вод із високою швидкістю обробки та низькими експлуатаційними витратами.

Функціоналізація вуглецевих нанотрубок дозволяє покращити їх сорбційну здатність та вибірковість стосовно різних забруднювачів. Введення карбоксильних та інших кисневмісних груп на поверхню нанотрубок підвищує адсорбцію органічних сполук і дозволяє створювати нанокompозити, у яких активні компоненти інтегровані у вуглецеві матриці або полімерні структури. Вуглецеві нанотрубки характеризуються високою механічною міцністю, розвиненою пористістю та питомою поверхнею до 3000 м<sup>2</sup>/г, що робить їх особливо ефективними для видалення вуглеводнів із стічних вод. Вуглецевий сажа використовується як каталізатор та адсорбент завдяки високій стабільності, електропровідності та можливості включення в композитні системи для підвищення ефективності очищення.

Поєднання магнітних та вуглецевих наночастинок на судні дозволяє створювати гібридні системи очищення, де магнітні частинки забезпечують

швидко видалення адсорбенту з забруднювачем, а вуглецеві структури гарантують високу ефективність сорбції нафтових сполук. Така комбінація мінімізує витрати наноматеріалів і скорочує час обробки стічних вод, що важливо для експлуатації судового обладнання в обмеженому просторі. Гібридні системи також дозволяють проводити повторну регенерацію наноматеріалів без втрати адсорбційної здатності, що робить технологію економічно та екологічно вигідною.

При розробці нанотехнологій для очищення нафтовмісних стічних вод враховуються й питання безпеки експлуатації. Магнітні наночастинки та вуглецеві структури розробляються з урахуванням мінімізації токсичності та запобігання виділенню наночастинок у навколишнє середовище. Крім того, функціоналізовані наноматеріали забезпечують високу селективність адсорбції, що дозволяє видаляти саме нафтові компоненти, не впливаючи на інші хімічні речовини, присутні у стічних водах судна.

Застосування нанотехнологій у судовій галузі також пов'язане з необхідністю обробки великих обсягів води з високою концентрацією нафтопродуктів. Використання наночастинок дозволяє вирішувати цю задачу ефективніше порівняно з традиційними методами механічної або хімічної очистки. Адсорбція нафтових забруднювачів за допомогою наноматеріалів дозволяє знизити концентрацію вуглеводнів до нормативних значень, забезпечуючи дотримання міжнародних стандартів очищення стічних вод та запобігаючи забрудненню морського середовища.

На судах, де простір і ресурси обмежені, важливою перевагою нанотехнологічних систем є їх компактність, енергоефективність і можливість багатократного використання матеріалів. Завдяки високій питомій поверхні наноматеріали забезпечують швидке видалення нафтопродуктів навіть у невеликих об'ємах фільтраційних модулів. Магнітні наночастинки дають змогу регенерувати адсорбенти без необхідності їх заміни, що знижує експлуатаційні витрати і спрощує технічне обслуговування. Крім того, наноматеріали можуть бути адаптовані до умов змінної солоності, температури та рН, що є типовими для морських систем. Застосування нанотехнологій в системі очищення нафтовмісних

стічних вод на судах відкриває можливість створення автономних установок замкненого циклу, які забезпечують не лише відповідність міжнародним екологічним стандартам, а й зменшення впливу судноплавства на морське середовище.

#### 4.4 Оцінка ефективності інноваційних методів порівнянно з традиційними

Очищення нафтовмісних стічних вод традиційними методами (механічними, фізико-хімічними та біологічними) має низку переваг, серед яких — технологічна відпрацьованість, відносна простота впровадження та економічна доступність. Проте їх ефективність обмежується низкою чинників: низька продуктивність при роботі з емульгованими та дрібнодисперсними вуглеводнями, чутливість до коливань фізико-хімічних параметрів середовища (рН, температура), а також утворення значних осадів, що потребують подальшої утилізації.

На відміну, наночасткові методи відкривають нові можливості у сфері очищення. Використання наноматеріалів як сорбентів або каталізаторів забезпечує високу питому поверхню адсорбції та значну реакційну здатність, що дозволяє ефективно видаляти навіть низькі концентрації нафтопродуктів. Дослідження підтверджують, що наночастки металів, оксидів металів здатні не лише зв'язувати нафтопродукти, але й каталізувати їх окиснення до менш токсичних або повністю мінералізованих сполук.

Порівняльні експерименти показали, що традиційні фізико-хімічні методи забезпечують зниження концентрації нафтопродуктів у середньому на 70–85 %, тоді як застосування наночасткових сорбентів та нанокаталізаторів дозволяє підвищити цей показник до 90–98 %. Важливою перевагою нанотехнологічних рішень є можливість багаторазової експлуатації без втрати їхніх сорбційних властивостей, що позитивно впливає на економічну доцільність у довгостроковій перспективі.

Обмеження наночасткових методів: висока вартість синтезу та модифікації наноматеріалів, необхідність їх стабілізації у робочому середовищі, а також

відсутність масштабованих промислових рішень для суднових умов експлуатації. Додатковим викликом є питання екологічної безпеки самих наночасток після їх використання, що потребує подальших досліджень.

#### 4.5 Висновки за розділом 4

1. Проведений аналіз сучасних технологій очищення нафтовмісних стічних вод традиційних та інноваційних методів видалення нафти, а також застосування наноматеріалів, зокрема магнітних та вуглецевих.

2. Визначені ключові фізико-хімічні, біологічні та експлуатаційні чинники, що перешкоджають ефективному процесу очищення. Практика демонструє, що на даний час методу 100% очищення не існує, а вибір технології ґрунтується на основі ступеню забруднення та на вимогах міжнародних стандартів.

3. Встановлено – механічні, фізико-хімічні та біологічні – забезпечують лише базовий рівень видалення нафтопродуктів, а нанотехнологічним може бути очищено до 99% емульсій.

4. Використання наноматеріалів, зокрема магнітних наночастинок  $Fe_3O_4$ , вуглецевих нанотрубок, графенових структур та активованого вугілля, дозволяє суттєво підвищити ефективність сорбції, компактність систем і можливість їх регенерації.

5. Особливу роль відіграють магнітні властивості наночастинок  $Fe_3O_4$ , які забезпечують зручність видалення та повторного використання адсорбентів, а також їх стабільність в умовах морського середовища.

6. Вуглецеві наноматеріали, мають можливість хімічної модифікації, розглядаються як перспективні сорбенти.

7. Наночастки забезпечують підвищення ступеня очищення нафтовмісних вод з 70–85 % традиційних методів до 90–99 % (табл. 4.1), одночасно зменшуючи негативний вплив судноплавства на морські середовища. Разом із тим, головними обмеженням залишаються висока вартість синтезу наноматеріалів та необхідність удосконалення систем.

Таблиця 4.1 – Порівняння ефективність наноматеріалів

Порівняльна ефективність наноматеріалів для очищення нафтовмісних стічних вод на судах						
Тип наноматеріалу / метод	Механізм дії	Ефективність видалення нафтопродуктів (%)	Можливість регенерації	Вартість / складність синтезу	Токсичність / екобезпека	Придатність до умов суден
<b>Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> (магнітні наночастинки)</b>	Магнітна адсорбція	90–97	Висока (магнітне відділення)	Середня	Низька при стабілізації	Висока — компактне обладнання, низькі енерговитрати
<b>Вуглецеві нанотрубки (CNT)</b>	Адсорбція, каталіз, функціоналізація	92–99	Середня — потрібна хімічна регенерація	Висока	Низька при функціоналізації	Висока — стійкість і багаторазове використання
<b>Оксид графену (GO)</b>	Хімічна адсорбція, селективне зв'язування	88–95	Середня	Висока	Низька	Середня — потребує стабільного середовища
<b>Активоване вугілля / біовугілля</b>	Фізична адсорбція	80–90	Висока (термічна регенерація)	Низька	Дуже низька	Висока — проста експлуатація
<b>Гібридні системи (Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>@CNT, GO@Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>)</b>	Комбінована магнітно-адсорбційна дія	<b>96–99</b>	<b>Дуже висока (магнітне відділення + повторне використання)</b>	Середня–висока	Низька при контрольованому використанні	<b>Найвища — оптимальне рішення для суден</b>

Нанотехнології становлять перспективний напрям підвищення ефективності очищення нафтовмісних стічних вод, забезпечуючи глибоке очищення, технологічну надійність і відповідність міжнародним екологічним вимогам.

## 5 ЕКОЛОГІЧНІ ТА ЕКОНОМІЧНІ АСПЕКТИ ВПРОВАДЖЕННЯ НАНОЧАСТИЧЕК

Застосування нанотехнологій у процесах очищення нафтовмісних стічних вод є одним із найперспективніших напрямків сучасної екології, що відкриває нові горизонти у боротьбі з нафтовим забрудненням водних об'єктів. Завдяки унікальним властивостям, високій реакційній здатності та можливості модифікації поверхні, наночастинки демонструють високу ефективність у видаленні нафти. Проте, поряд із перевагами, використання наноматеріалів потребує комплексного підходу.

### 5.1 Вплив нанотехнологій на навколишнє середовище

Використання наночастинок у технологіях очищення нафтовмісних стічних вод демонструє значний потенціал з точки зору екологічної ефективності. Завдяки високій питомій поверхні та активним функціональним групам на поверхні, наночастинки забезпечують інтенсивну адсорбцію та каталізацію, що дозволяє досягати глибокого очищення за значно коротший час у порівнянні з традиційними методами. Це зменшує обсяг вторинних відходів, скорочує потребу у великогабаритному обладнанні.

На відміну від хімічних методів, які передбачають внесення коагулянтів або флокулянтів, наночастинки діють за принципом високоефективної адсорбції чи каталізу, що знижує хімічне навантаження на водне середовище та ризик утворення вторинних токсичних сполук. Особливої уваги заслуговує можливість повторного використання наночастинок, зокрема магнітних матеріалів або модифікованих біополімерів, які легко вилучаються з очищеної води за допомогою магнітного поля, регенеруються та застосовуються повторно. Такий підхід, побудований на принципах циркулярної економіки, зменшує утворення твердих відходів і мінімізує споживання первинних матеріалів. Крім того, зменшення енергоспоживання та кількості хімічних реагентів сприяє зниженню викидів парникових газів, що є

особливо актуальним у контексті глобальної кліматичної кризи. Технології на основі наночастинок також ефективно справляються з очищенням стоків, що містять нафтові емульсії та мікрокраплі, раніше потребуючи багатоступеневих і ресурсомістких схем.

#### 5.1.1 Потенційні екологічні ризики

Попри значні переваги, використання наночастинок у водоочисних технологіях пов'язане з низкою екологічних ризиків. Найбільше занепокоєння викликає можливість їхнього потрапляння у природні водні об'єкти внаслідок аварій, неякісної експлуатації або недостатньої ефективності систем збору та регенерації. Завдяки малому розміру та високій реакційній здатності наночастинок можуть проникати у тканини живих організмів, долати клітинні мембрани та взаємодіяти з біомолекулами, змінюючи їхню структуру та функції. У водних екосистемах це може призводити до токсичних ефектів, таких як пригнічення росту фітопланктону.

#### 5.1.2 Шляхи мінімізації негативного впливу

Для зниження екологічних ризиків необхідно впроваджувати замкнені технологічні цикли з повним збором і регенерацією наночастинок після їхнього використання. Перспективним напрямом є розробка біорозкладних або екологічно інертних наноматеріалів, здатних безпечно трансформуватися у природному середовищі. Обов'язковими стають процедури екологічного моніторингу, що включають визначення концентрацій наночастинок у воді, донних відкладах та біоті після очищення, що дозволить оперативно реагувати на можливі негативні наслідки та коригувати технологічний процес.

Кінцева утилізація відпрацьованих наночастинок також вимагає спеціальних підходів. Залежно від їхнього складу, можливим є застосування термічного знешкодження, хімічної пасивації або іммобілізації у твердих матрицях, що забезпечить безпечне видалення з екосистеми.

З урахуванням усіх переваг і недоліків, технології очищення нафтовмісних стічних вод із застосуванням наночастинок мають значний потенціал для зменшення негативного впливу нафтового забруднення на довкілля. При правильному проектуванні, суворому контролі експлуатації та впровадженні замкнених циклів ці системи здатні забезпечити глибоке очищення з мінімальним утворенням вторинних відходів і низьким екологічним навантаженням. Водночас масове застосування наночастинок у водоочищенні повинно супроводжуватися системними дослідженнями їхньої токсичності, стійкості у природних умовах та довготривалого впливу на біоту. Лише за умови збалансування високої ефективності очищення та екологічної безпечності впровадження нанотехнологій стане реальним кроком до збереження водних ресурсів у глобальному масштабі.

## 5.2 Економічне обґрунтування модернізації систем очищення

Модернізація систем очищення нафтовмісних вод на суднах має як екологічне, так і економічні фактори. Ефективність очищення впливає не лише на дотримання міжнародних норм (MARPOL, ISO, IMO), а й на витрати судновласників, пов'язані з експлуатацією та утилізацією відходів.

Впровадження сучасних систем очищення, таких як методи з використанням наночастинок, дозволяє суттєво зменшити вміст нафти в льяльних водах. Це призводить до прямого скорочення витрат. Крім того, більш ефективне видалення забруднень знижує ризик аварійного зупинення систем через засмічення або корозію, це зменшує витрати на ремонт та обслуговування.

Сучасні системи очищення дозволяють отримати концентрати забруднень з меншим об'ємом і більш стабільним нафтовмістом. Це зменшує витрати на транспортування та утилізацію відходів, оскільки вартість утилізації часто розраховується пропорційно обсягу або масі забрудненого матеріалу.

Недотримання міжнародних стандартів щодо забруднення вод може призвести до штрафів, затримок судна у портах та негативного впливу на репутацію компанії. Модернізація систем очищення забезпечує відповідність стандартам MARPOL

Annex I і II, що дозволяє уникнути фінансових санкцій та забезпечити безперебійну роботу судна.

Інвестиції в модернізацію систем очищення мають високий потенціал окупності за рахунок її багатофункціональності, багаторазового використання та утилізацію відходів. Розрахунки для середніх танкерів (до 50 тис. тонн) показують, що термін окупності модернізації сучасної системи очищення складає від 3 до 7 років залежно від інтенсивності експлуатації та розвитку цієї сфери.

Згідно з проведеними розрахунками (табл. 5.1), модернізована система дозволяє скоротити річні витрати на експлуатацію та утилізацію, повністю усунути ризики штрафів за перевищення норм забруднення. Зазначений термін окупності інвестицій у сучасні нанотехнологічні системи становить у середньому від трьох до семи років залежно від інтенсивності експлуатації судна, що свідчить про високу рентабельність.

Таблиця 5.1 – Порівняння економічних показників до та після модернізації системи очищення

Показник	Традиційна система	Модернізована система	Економія, %
Витрати на, \$/рік	10 000	3 000	70
Витрати на утилізацію, \$/рік	3 750	1 500	60
Потенційні штрафи, \$/рік	40 000	0	100
Загальна витрата, \$/рік	53 750	4 500	91,63

Очікується подальший розвиток нанотехнологій у поєднанні з автоматизованими системами що дозволить створити високопродуктивні, енергоефективні та екологічні установки нового покоління.

В цілому впровадження наночастинок у системи очищення нафтовмісних стічних вод є інноваційним і вигідним рішенням, ця система поєднує екологічність,

економічність та технологічну перспективу. Результат аналізу підтвердив що нанотехнології можуть стати ключовим у забезпеченні чистоти навколишнього середовища.

### 5.3 Перспективи розвитку технологій очищення суднових вод

Перспективність нанотехнологій у очищення суднових вод становить: унікальними фізико-хімічними властивостями наноматеріалів, високою сорбцією, здатністю каталізувати окисно-відновні процеси, а також можливістю встановлення у старі системи. Це відкриває нові можливості для модернізації традиційних суднових очисних установок.

Подальший розвиток технологій наночастинок за такими напрямками:

Синтез та модифікація наноматеріалів з підвищеною селективністю. Дослідження спрямовуватимуться на створення функціоналізованих наночастинок, здатних ефективно зв'язувати та утримувати нафтопродукти навіть у багатокомпонентних середовищах, поверхнево-активні речовинах ,а також важкі метали.

Інтеграція наночастинок у мембранні та комбіновані системи. Використання наноструктурованих матеріалів у складі мембран сприятиме підвищенню їх антифоулінгових властивостей, подовженню експлуатаційного ресурсу та забезпеченню одночасного механізму сорбції й каталітичної деградації домішок.

Розробка ефективних методів регенерації та повторного використання. Економічна конкурентоспроможність нанотехнологій безпосередньо пов'язана з можливістю багаторазової регенерації наноматеріалів із збереженням їхніх сорбційно-каталітичних характеристик. Очікується вдосконалення фізико-хімічних та електрохімічних методів регенерації.

Мініатюризація та автоматизація очисних модулів. Завдяки компактності наноматеріалів перспективним є створення модульних блоків для суднових систем, що забезпечуватимуть високу продуктивність за обмежених просторових ресурсів.

Поєднання нанотехнологій з автоматизованим моніторингом параметрів очистки дозволить підвищити надійність функціонування установок.

#### 5.4 Висновки за розділом 5

1. Проведений аналіз ефективності, безпеки та доцільності використання нанотехнологій у процесах очищення нафтовмісних стічних вод. Основна увага полягла в оцінці впливу наночастинок на довкілля, економічному обґрунтуванню модернізації очисних систем та визначенню перспектив розвитку цих технологій у морській галузі.

2. Встановлено, що наночастинок, завдяки своїм унікальним фізико-хімічним властивостям, високій питомій поверхні, забезпечують підвищення ефективності очищення нафтовмісних емульсій.

3. Використання наноматеріалів дозволяє видалення нафтових забруднень у коротший термін, та мінімізує обсяги вторинних відходів, потребу в реагентах, що в цілому знижує екологічне навантаження на водні середовища. Також магнітні наночастинок використовуються багаторазово та їхню регенерацію, це вказує на економію в подальшому, що сприяє раціональному використанню.

4. З проведеного аналізу визначено, що удосконалення суднових очисних систем із застосуванням нанотехнологій сприяє зменшенню експлуатаційних витрат, витрат на утилізацію та усуває ризики штрафних санкцій за порушення екологічних норм. Модернізація суднових систем очищення вказує на впровадження нанотехнологій є не лише екологічно доцільним, а й фінансово вигідним..

## ВИСНОВКИ

Основним науковим результатом дипломної роботи є обґрунтування можливості підвищення ефективності процесу очищення нафтовмісних вод, за допомогою наночастинок, які здатні забезпечити глибоке вилучення залишкових нафтопродуктів при мінімальних енергетичних витратах та компактних габаритах обладнання.

1. Проведено аналіз сучасного стану проблеми очищення нафтовмісних суднових вод, визначено основні технологічні недоліки традиційних методів: механічних, коалесцентних, фізико-хімічних, біологічних, мембранних.

2. Застосування наноматеріалів, зокрема магнітних наночастинок  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ , вуглецевих нанотрубок CNT, та оксиду графену GO, дозволяє досягти значно вищого ступеня очищення води завдяки великій площі поверхні, високій адсорбційній здатності та можливості магнітного відокремлення наночастинок після використання.

3. Аналіз підтвердив, що використання нанотехнологій в системи очищення забезпечують видалення нафтопродуктів на рівні 90–99 %, що перевищує середні показники традиційних методів, які складають зазвичай 65–80% та повністю відповідає міжнародним нормам MARPOL 73/78.

4. Система очищення нанотехнологічними матеріалами може бути вбудована в сепаратор лляльних вод з мінімальним втручанням в його конструкцію.

5. Властивості регенерації наноматеріалів дозволяє знизити експлуатаційні витрати та зменшити викиди в навколишнє середовище.

6. В порівнянні традиційних і нанотехнологічних систем очищення, встановлено, що використання наноматеріалів дає змогу зменшити залишкову концентрацію нафтопродуктів у воді до рівня менше 5 ppm, що відповідає і навіть перевищує міжнародні стандарти.

7. Оцінка екологічних та економічних аспектів впровадження наночастинок у систему очищення, вказує на доцільність у довгостроковій перспективі, що

досягається за рахунок зниження зносу компонентів, вартості очищення і штрафних санкцій за порушення екологічних норм.

8. Результати мають як наукове, так і практичне значення, які спрямовані на вдосконалення технологій очищення нафтовмісних вод, що спрямоване на екологічність судноплавства . Запропонований метод відкриває перспективи для подальших досліджень у сфері застосування наноматеріалів.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. MARPOL Consolidated Edition 2022. Articles, Protocols, Annexes and unified interpretations of the International Convention for the Prevention of Pollution from Ships, 1973, as modified by the 1978 and 1997 Protocols Incorporating all Amendments in Force on 1 November 2022. Seventh Edition, International Maritime Organization. London, 2022. – 401 p.
2. Resolution MEPC.107(49) – Revised Guidelines and Specifications for Pollution Prevention Equipment for Machinery Space Bilges of Ships (Adopted on 18 July 2003), as amended by Resolution MEPC.285(70) (Adopted on 28 October 2016).
3. Суднові установки очищення нафтовмісних вод: нормативні вимоги, методи очищення, конструкція та експлуатація: навчальний посібник / Д. Г. Парменова, І. М. Кулешов, В. М. Калугін. – Одеса : НУ ОМА. – 2025. – 148 с. ISBN 978-617-7857-47-0
4. Alfa Laval Corporate AB. PureBilge: Technical information for bilge water treatment. – 20 p.
5. Горайчук С.С., Парменова Д.Г. Підвищення ефективності сепарації нафтовмісних вод у судових умовах // Матеріали науково-технічної конференції молодих дослідників "Суднові енергетичні установки: експлуатація та ремонт", 20.11.2025. – Одеса: НУ «ОМА», 2025. – с. 22-25.
6. Байрамов А.Р., Куропятник О.А. Реалізація вимог marpol щодо попередження забруднення довкілля судовими водами, що містять нафту // Матеріали науково-технічної конференції молодих дослідників "Суднові енергетичні установки: експлуатація та ремонт", 16.11.2022. – Одеса: НУ «ОМА», 2022. – С. 41-45. URL: <http://onma.edu.ua/naukovi-konferentsiyi-ta-seminary>
7. Рябчиков, М. Л. Science methodology. Методологія наукових досліджень. Луцьк: ЛНТУ, 2022. - 82 с.
8. Коломієць, А.М.; Громов, Є.В. Methodology and Principles of Scientific Research. Вінниця: ФОП Корзун Д.Ю., 2020. -188 с.
9. Wikimedia Commons: веб-сайт. URL: [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:OWS\\_scheme.jpg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:OWS_scheme.jpg)

10. Парменова Д.Г., Кулешов І.М. Методи очищення нафтовмісних вод на судах: переваги, недоліки та перспективи розвитку // Матеріали науково-технічної конференції «Морський та річковий флот: експлуатація і ремонт», 20.03.2025 – 21.03.2025.– Одеса: НУОМА, 2025. – С. 141 – 144.

11. Sutherland, K. *Filters and Filtration Handbook*, 5th ed.; Butterworth-Heinemann: Oxford, UK, 2008.- 536 с. ISBN: 978-1-8561-7464-0

12. Lu, H.; Liu, Y.Q.; Cai, J.B.; Xu, X.; Xie, L.S.; Yang, Q.; Li, Y.X.; Zhu, K. Treatment of offshore oily produced water: Research and application of a novel fibrous coalescence technique. *J. Pet. Sci. Eng.* 2019, 178 – pp. 602–608. <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2019.03.025>

13. Hao, L.; Zhicheng, P.; Hualin, W.; Yiqian, L.; Pinyi, D.; Qiang, Y. Fiber coalescence treatment of oily wastewater: A new theory and application. *J. Hazard. Mater.* 2021, 412, 125188. DOI: [10.1016/j.jhazmat.2021.125188](https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2021.125188)

14. McLaughlin, C.; Falatko, D.; Danesi, R.; Albert, R. Characterizing shipboard bilgewater effluent before and after treatment. *Environ. Sci. Pollut. Res.* 2014, 21, pp.5637–5652 DOI:[10.1007/s11356-013-2443-x](https://doi.org/10.1007/s11356-013-2443-x)

15. Khaled Abuhasel; Mohamed Kchaou; Mohammed Alquraish; Yamuna Munusamy; Yong Tzyy Jeng; *Oily Wastewater Treatment: Overview of Conventional and Modern Methods, Challenges, and Future Opportunities. Section Wastewater Treatment and Reuse. Water*, 2021, 13(7), 980; <https://doi.org/10.3390/w13070980>

16. Agarwal, S.; von Arnim, V.; Stegmaier, T.; Planck, H.; Agarwal, A. Effect of fibrous coalescer geometry and operating conditions on emulsion separation. *Ind. Eng. Chem. Res.* 2013, 52, pp.13164 – 13170. <https://doi.org/10.1021/ie4018995>

17. Li, J.-J. Technology of oil-bearing wastewater treatment in the China Great Wall Aluminium Company. *Ind. Water Treat.* 2002, 22, pp.54–56. DOI: [10.11894/1005-829x.2002.22\(2\).54](https://doi.org/10.11894/1005-829x.2002.22(2).54)

18. Wang, P.; Li, M. Pilot Test of Oily Wastewater Treatment Facility Carried on the Vehicle in Jiangnan Oil Field. *Sci. Technol. Overseas Build. Mater.* 2008, 29, pp.144–146

19. LifeWater: веб-сайт. URL: <https://lifewater.com.ua/separator-nefteproduktov-fsn>

20. Oleg A. Onishchenko, Oleksiy M. Melnyk, Vladimir A. Yarovenko, Nadiia I. Aleksandrovska, Serhii V. Kurdiuk, Dana G. Parmenova, Oleksandr O. Storchak Study of efficiency and advancement of marine engine oil purification and filtration technologies // Vol. 31 No. 4 (2023): Journal of Chemistry and Technologies. – pp.762-774. <https://doi.org/10.15421/jchemtech.v31i4.285643>.

21. Боярко О.І., Парменова Д.Г. Забезпечення екологічних показників суднових енергетичних установок шляхом очищення вод, що містять нафту / Матеріали науково-технічної конференції молодих дослідників "Суднові енергетичні установки: експлуатація та ремонт", 16.11.2022. – Одеса: НУ «ОМА», 2022. – С.272 – 276.

22. Flottweg SE. Separation Technology. Separator Functional Principle: веб-сайт. URL: <https://www.flottweg.com/wiki/separation-technology/separator-functional-principle/>

23. Le, T.V.; Imai, T.; Higuchi, T.; Yamamoto, K.; Sekine, M.; Doi, R.; Vo, H.T.; Wei, J. Performance of tiny microbubbles enhanced with “normal cyclone bubbles” in separation of fine oil-in-water emulsions. Chem. Eng. Sci. 2013, 94, pp. 1–6. DOI :<https://doi.org/10.1016/J.CES.2013.02.044>

24. Hanafy, M.; Nabih, H.I. Treatment of Oily Wastewater Using Dissolved Air Flotation Technique. Energy Sources Part A 2007, 29, pp.143–159. DOI: <https://doi.org/10.1080/009083190948711>

25. David, H.F.; Liptak, B.G. Wastewater Treatment; Lewis Publishers: New York, NY, USA, 2000. – 470 p.

26. Mysore, D.; Viraraghavan, T.; Jin, Y.C. Oil/water separation technology-A review. Journal of Residuals Science and Technology, 3(1) 2006: pp.5-14. URL: [https://www.researchgate.net/publication/287528335\\_Oilwater\\_separation\\_technology\\_-\\_A\\_review](https://www.researchgate.net/publication/287528335_Oilwater_separation_technology_-_A_review)

27. Khan, M.Z.; Mondal, P.K.; Sabir, S. Aerobic granulation for wastewater bioremediation: A review. Can. J. Chem. Eng. 2013, 91, pp. 1045–1058. DOI:[10.1002/cjce.21729](https://doi.org/10.1002/cjce.21729)

28. Sea-Man.org. Системи загально суднового призначення: веб-сайт. URL: <https://sea-man.org/naznacheniya-obshhesudovyh-sistem.html>
29. Родіонов А.І. Охорона навколишнього середовища: процеси і апарати захисту гідросфери 2018. Studme.org: веб-сайт. URL: [https://studme.org/177698/ekologiya/regeneratsiya\\_adsorbenta](https://studme.org/177698/ekologiya/regeneratsiya_adsorbenta)
30. Кольцов В.Б. Процеси та пристрої захисту доквілля, 2018. Studme.org: веб-сайт. URL: [https://studme.org/275388/matematika\\_himiya\\_fizik/flokulyatsiya](https://studme.org/275388/matematika_himiya_fizik/flokulyatsiya)
31. Primasari, B.; Ibrahim, S.; Annuar, M.S.M.; Remmie, L.X.I. Aerobic treatment of oily wastewater: Effect of aeration and sludge concentration to pollutant reduction and PHB accumulation. Conference: WASET - ICEET (International Conference on Environmental Engineering and Technology), Amsterdam, Netherlands, Volume 5 No. 6 2011. pp. 172–176. ISSN 2010-376X. URL: [https://www.researchgate.net/publication/283070550\\_Aerobic\\_Treatment\\_of\\_Oily\\_Wastewater\\_Effect\\_of\\_Aeration\\_and\\_Sludge\\_Concentration\\_to\\_Pollutant\\_Reduction\\_and\\_PHB\\_Accumulation](https://www.researchgate.net/publication/283070550_Aerobic_Treatment_of_Oily_Wastewater_Effect_of_Aeration_and_Sludge_Concentration_to_Pollutant_Reduction_and_PHB_Accumulation)
32. Van Loosdrecht, M.C.; Beun, J.J.; Heijnen, J.J. Poly-[beta]-hydroxyalkanoate metabolism in activated sludge. In Advances in Water and Wastewater Treatment Technology; Tomonori, M., Keisuke, H., Satoshi, T., Hiroyasu, S., Eds.; Elsevier Science B.V.: Amsterdam, The Netherlands, 2001; pp. 239–248. DOI:[10.1002/3527600035.bpol3a12](https://doi.org/10.1002/3527600035.bpol3a12)
33. Kurian, R.; Nakhla, G. Performance of aerobic MBR treating high strength oily wastewater at mesophilic–thermophilic transitional temperatures. Proc. Water Environ. Fed. 2006, 2006, pp.3249–3255. DOI:[10.2175/193864706783751519](https://doi.org/10.2175/193864706783751519)
34. Corsino, S.F.; Campo, R.; di Bella, G.; Torregrossa, M.; Viviani, G. Aerobic granular sludge treating shipboard slop: Analysis of total petroleum hydrocarbons loading rates on performances and stability. Process Biochem. 2018, 65, pp.164–171. <https://doi.org/10.1016/j.procbio.2017.11.005>
35. Milia, S.; Porcu, R.; Rossetti, S.; Carucci, A. Start-up of a granular sludge sequencing batch reactor for the treatment of 2,4- dichlorophenol-contaminated

wastewater. *Water Sci. Technol.* 2013, 68, pp. 2151–2157.  
<https://doi.org/10.2166/wst.2013.470>

36. Li, J.; Sun, S.; Yan, P.; Fang, L.; Yu, Y.; Xiang, Y.; Wang, D.; Gong, Y.; Gong, Y.; Zhang, Z. Microbial communities in the functional areas of a biofilm reactor with anaerobic–aerobic process for oily wastewater treatment. *Bioresource Technology*, Volume 238, 2017, , pp. 7–15. DOI: [10.1016/j.biortech.2017.04.033](https://doi.org/10.1016/j.biortech.2017.04.033)

37. Mannina, G.; Cosenza, A.; Di Trapani, D.; Capodici, M.; Viviani, G. Membrane bioreactors for treatment of saline wastewater contaminated by hydrocarbons (diesel fuel): An experimental pilot plant case study. *Chem. Eng. J.* 2016, 291, pp. 269–278. DOI: [10.1016/j.cej.2016.01.107](https://doi.org/10.1016/j.cej.2016.01.107)

38. Mannina, G.; Capodici, M.; Cosenza, A.; Di Trapani, D.; Viviani, G. Sequential batch membrane bio-reactor for wastewater treatment: The effect of increased salinity. *Bioresource Technology*, Volume 209, 2016, pp. 205–212. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2016.02.122>

39. Laurinonyte, J.; Meulepas, R.J.W.; Van Den Brink, P.; Temmink, H. Membrane Bioreactor (MBR) as Alternative to a Conventional Activated Sludge System Followed by Ultrafiltration (CAS-UF) for the Treatment of Fischer-Tropsch Reaction Water from Gas-to-Liquids Industries. *Water, Air, & Soil Pollution, International Journal of Environmental Pollution*. Volume 228, article number 137, 2017. <https://link.springer.com/article/10.1007/s11270-017-3300-1>

40. Pendashteh, A.R.; Fakhru'l-Razi, A.; Chuah, A.L.; Radiah, A.B.D.; Madaeni, S.S.; Zainal, Z.A. Biological treatment of produced water in a sequencing batch reactor by isolated halophilic microorganism consortium. *Environmental Technology*. Volume 31, 2010 - Issue 11, pp. 1229–1239. DOI: [10.1080/09593331003646612](https://doi.org/10.1080/09593331003646612)

41. Capodici, M.; Cosenza, A.; Di Trapani, D.; Mannina, G.; Torregrossa, M.; Viviani, G. Treatment of oily wastewater with membrane bioreactor systems. *Special Issue Oily Water Treatment*, Volume 9, 2017. <https://doi.org/10.3390/w9060412>

42. Pendashteh, A.R.; Abdullah, L.C.; Fakhru'l-Razi, A.; Madaeni, S.S.; Abidin, Z.Z.; Biak, D.R.A. Evaluation of membrane bioreactor for hypersaline oily wastewater

treatment. *Process Saf. Environ. Prot.* 2012, 90, pp. 45–55.

DOI:[10.1016/j.psep.2011.07.006](https://doi.org/10.1016/j.psep.2011.07.006)

43. Campo, R.; Di Bella, G. Petrochemical slop wastewater treatment by means of aerobic granular sludge: Effect of granulation process on bio-adsorption and hydrocarbons removal. *Chemical Engineering Journal*, Volume 378, 2019.

DOI:[10.1016/j.cej.2019.122083](https://doi.org/10.1016/j.cej.2019.122083)

44. Le, N.L.; Nunes, S.P. Materials and membrane technologies for water and energy sustainability. *Sustainable Materials and Technologies*, Volume 7, 2016, 7, pp. 1–28.

DOI:[10.1016/j.susmat.2016.02.001](https://doi.org/10.1016/j.susmat.2016.02.001)

45. Fard, A.K.; McKay, G.; Buekenhoudt, A.; Al Sulaiti, H.; Motmans, F.; Khraisheh, M.; Atieh, M. Inorganic membranes: Preparation and application for water treatment and desalination. *Materials*, Special Issue Sorption Materials for Environment Purification, 2018, 11(1), 74 . DOI:[10.3390/ma11010074](https://doi.org/10.3390/ma11010074)

46. Shi, X.; Tal, G.; Hankins, N.P.; Gitis, V. Fouling and cleaning of ultrafiltration membranes: A review. *Journal of Water Process Engineering*, Volume 1, April 2014, pp. 121-138. <https://doi.org/10.1016/J.JWPE.2014.04.003>

47. Huang, S.; Ras, R.H.; Tian, X. Antifouling membranes for oily wastewater treatment: Interplay between wetting and membrane fouling. *Current Opinion in Colloid & Interface Science*, Volume 36, July 2018, pp. 90-109. <https://doi.org/10.1016/j.cocis.2018.02.002>

48. Salimi, E. Omniphobic surfaces: State-of-the-art and future perspectives. *Journal of Adhesion Science and Technology*, Volume 33, Issue 12, 2019 – pp. 1369–1379. <https://doi.org/10.1080/01694243.2019.1599217>

49. Orest Kuntiyi, R. L. Bukliv, Yu. V. Boyko, T. V. Hreben, A. V. Lysenko. Nanomaterials and nanotechnology in water purification. Review // Scientific journal "Chemistry, technology and application of substances". Volume 1, Number 1, 2018 – pp. 27-37. <https://doi.org/10.23939/ctas2018.01.027>

50. Amber J. Pete; Bhuvnesh Bharti; Michael G. Benton; Nano-enhanced Bioremediation for Oil Spills. *ACS ES&T Engineering*, Vol 1 / Issue 6, 2021, pp.928–946. DOI:[10.1021/acsestengg.0c00217](https://doi.org/10.1021/acsestengg.0c00217)

51. Yuvaraja Dibdalli; Héctor Pérez; Alejandro Lopez T.; Cesar Morales-Verdejo; Tailoring the Catalytic Activity of Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> Nanoparticles for KNO<sub>3</sub> Decomposition via Surface Functionalization. *Journal of Cluster Science*, Volume 36, article number 41, 2025. DOI:10.1007/s10876-024-02758-y

52. Olena Okhay; Alexander Tkach; Graphene/Reduced Graphene Oxide-Carbon Nanotubes Composite Electrodes: From Capacitive to Battery-Type Behaviour ( Special Issue *Ceramics and Nanostructures for Energy Harvesting and Storage*), 2021. <https://doi.org/10.3390/nano11051240>

53. Martin J. Sweetman; Steve May; Nick Mebberson; Phillip Pendleton; Krasimir Vasilev; Sally E. Plush; John D. Hayball; Activated Carbon, Carbon Nanotubes and Graphene: Materials and Composites for Advanced Water Purification (Special Issue *Functional Carbon Materials and Applications*) 2017. <https://doi.org/10.3390/c3020018>

54. Zhang, Yichuan; Zhang, Qichun; Chen, Guangming; Carbon and carbon composites for thermoelectric applications. *Carbon Energy: Volume 2, Issue 3*. pp.408–436 DOI:10.1002/cey2.68

55. Qinghua Qin. Research Progress and Applications of Carbon Nanotubes, Black Phosphorus, and Graphene-Based nanomaterials: Insights from Computational Simulations. *Computers, Materials & Continua* 2025, 85(1), pp. 1-39 <https://doi.org/10.32604/cmc.2025.067293>

56. Jiantong Sun, Cheng Liu, Huili Wang, Yu Cao, Xinpeng Han, Shaojie Zhang, Haipeng Wang, Yiming Zhang, Aibing Chen, Zhanxu Yang, Jie Sun Core-shell structure of a polypyrrole-coated phosphorus/carbon nanotube anode for high-performance lithium-ion batteries *ACS Applied Energy Materials*. Vol 4 / Issue 4, pp.4112–4118. <https://doi.org/10.1021/acsaem.1c00459>