

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Національний університет кораблебудування
імені адмірала Макарова

Факультет економіки та екології моря

Кафедра екології та природоохоронних технологій

« «Допущений до захисту»
Завідувач кафедри
 Трохименко Г.Г.
« 15 » 12 2025 р.

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на здобуття ступеня вищої освіти «магістр»

на тему **«ОЦІНКА ЖИТТЄВОГО ЦИКЛУ СОРБЕНТІВ НАФТИ В
КОНТЕКСТІ ОБГРУНТУВАННЯ ЕКОЛОГІЧНОЇ БЕЗПЕКИ ЇХ
ЗАСТОСУВАННЯ»**

Виконав: студент 6271м групи

 **Цівенков М.В.**
(підпис)

Керівник: к.е.н., доцент
(посада, науковий ступінь, вчене звання)

 **Літвак О.А.**
(підпис)

Миколаїв – 2025

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

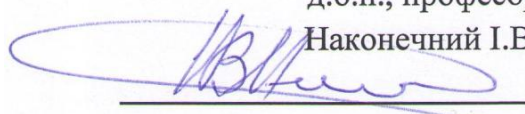
Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова

Факультет економіки та екології моря

Кафедра _____ екології та природоохоронних технологій _____

Спеціальність 101 Екологія _____

Освітня програма «Екологія та охорона навколишнього середовища» _____

«ЗАТВЕРДЖУЮ»
Гарант освітньої програми
д.б.н., професор
Наконечний І.В.

« 15 » 12 2025 року

ЗАВДАННЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ на здобуття ступеня вищої освіти «магістр»

Студенту _____ Цівенкову Максиму Вікторовичу _____

(прізвище, ім'я, по батькові)

1.Тема роботи: «Оцінка життєвого циклу сорбентів нафти в контексті обґрунтування екологічної безпеки їх застосування» _____

Керівник роботи Літвак Ольга Анатоліївна, канд. екон. наук, доцент _____

(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

Затверджені наказом ректора № 1312-УЧ від « 31 » жовтня 2025 року

2. Термін подання роботи: 10.12.2025 р. _____

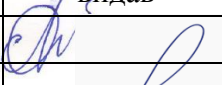
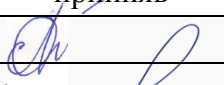
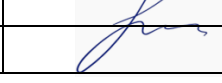
3. Вихідні дані по роботі: нормативно-законодавчі акти, методичні рекомендації, наукові публікації за темою дослідження. _____

4. Перелік питань, що належать до розробки (найменування розділів)

1. Теоретичні основи застосування нафтових сорбентів. 2. Технологія локалізації аварійного розливу нафти і нафтопродуктів на водному об'єкті із застосуванням сорбентів. 3. Аналіз життєвого циклу нафтових сорбентів. 4. Етап утилізації та регенерації використаних сорбентів та інтерпретація результатів оцінки життєвого циклу. 5. Економічна оцінка методів утилізації та регенерації використаних сорбентів нафти 6. Охорона праці.

5. Перелік презентаційних матеріалів: Презентація – 22 слайди.

6. Консультанти розділів проекту (роботи)

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
5	Літвак О.А., к.е.н., доцент		
6	Маринець О.М., к.т.н., доцент		

7. Дата видачі завдання 03.09.2025 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

Номер	Назва етапів роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1	Вибір теми кваліфікаційної роботи	03.09.2025	
2	Визначення мети, завдань, об'єкта та предмета дослідження	10.09.2025	
3	Складання плану, підбір і опрацювання списку використаних джерел	17.09.2025	
4	Теоретичні основи застосування нафтових сорбентів	28.09.2025	
5	Технологія локалізації аварійного розливу нафти і нафтопродуктів на водному об'єкті із застосуванням сорбентів	14.10.2025	
6	Аналіз життєвого циклу нафтових сорбентів	20.10.2025	
7	Етап утилізації та регенерації використаних сорбентів та інтерпретація результатів оцінки життєвого циклу	26.10.2025	
8	Економічна оцінка методів утилізації та регенерації використаних сорбентів нафти	15.11.2025	
9	Розробка заходів з охорони праці та техніки безпеки	25.11.2025	
10	Оформлення пояснювальної записки кваліфікаційної роботи	30.11.2025	
11	Підготовка до захисту кваліфікаційної роботи	10.12.2025	
12	Захист кваліфікаційної роботи	23.12.2025	

Студентка


(підпис)

Цівенков М.В.
(прізвище та ініціали)

Керівник роботи


(підпис)

Літвак О.А.
(прізвище та ініціали)

Анотація
до кваліфікаційної роботи «Оцінка життєвого циклу сорбентів нафти в
контексті обґрунтування екологічної безпеки їх застосування»
студента Цівенкова Максима Вікторовича

Кваліфікаційна робота присвячена комплексному дослідженню застосування нафтових сорбентів для локалізації та ліквідації розливів нафти і нафтопродуктів на водних об'єктах, а також оцінці їх життєвого циклу з урахуванням екологічних, технологічних та економічних аспектів. Актуальність теми зумовлена зростанням частоти аварійних ситуацій на водному транспорті, збільшенням обсягів перевезення нафтопродуктів та необхідністю впровадження ефективних, екологічно безпечних і економічно обґрунтованих методів ліквідації забруднень.

У першому розділі розглянуто теоретичні основи застосування нафтових сорбентів, проаналізовано екологічні наслідки розливів нафти у водному середовищі, описано сучасні засоби і методи локалізації забруднень, розкрито фізико-хімічні основи процесу сорбції та представлено класифікацію і характеристики основних типів сорбентів.

У другому розділі наведено технологію локалізації аварійних розливів за допомогою сорбентів, наведено алгоритм операцій для різних умов забруднення, а також виконано розрахунок необхідної кількості сорбенту для ліквідації розливу заданого масштабу.

Третій розділ присвячено аналізу життєвого циклу нафтових сорбентів відповідно до міжнародних стандартів ISO 14040 та ISO 14044. Узагальнено модель життєвого циклу від стадії виробництва до утилізації, досліджено основні екологічні навантаження, що виникають на кожному етапі.

У четвертому розділі розглянуто існуючі методи утилізації та регенерації використаних сорбентів. Проведено інтерпретацію результатів оцінки життєвого циклу та запропоновано напрями оптимізації процесу поводження із сорбентами з метою зменшення екологічного впливу і підвищення ресурсоощадності.

У п'ятому розділі здійснено економічну оцінку методів утилізації та регенерації поліпропіленових сорбентів. Визначено економічну доцільність різних технологій та обґрунтовано рентабельність застосування регенерації методом низькотемпературного нагрівання з отриманням вторинної нафтової фракції.

У шостому розділі викладено положення охорони праці та техніки безпеки при роботі із сорбентами в умовах ліквідації розливів нафти.

Кваліфікаційна робота складається із вступу, шести розділів, висновків, списку використаних джерел і додатку. Основний зміст викладено на 106 сторінках комп'ютерного тексту, у тому числі 25 рисунків, 25 таблиць. Список використаних джерел складається із 69 найменувань.

Ключові слова: нафтові сорбенти, розливи нафти, локалізація забруднень, сорбція; життєвий цикл, утилізація сорбентів, регенерація, екологічна оцінка, економічна ефективність.

Summary
to the qualification work «Life cycle assessment of oil sorbents in the context of
substantiating the environmental safety of their use»
Tsivenkov Maksym

The qualification paper is devoted to a comprehensive study of the application of oil sorbents for the containment and removal of oil and petroleum product spills on water bodies, as well as to the assessment of their life cycle considering environmental, technological, and economic aspects. The relevance of the topic is determined by the increasing frequency of emergency situations in water transport, the growing volume of petroleum product transportation, and the need to implement effective, environmentally safe, and economically justified methods for eliminating pollution.

The first chapter examines the theoretical foundations of using oil sorbents, analyzes the environmental consequences of oil spills in aquatic environments, describes modern means and methods of spill containment, outlines the physicochemical principles of sorption processes, and presents the classification and characteristics of the main types of sorbents.

The second chapter presents the technology for localizing emergency spills using sorbents, provides an operational algorithm for various pollution conditions, and calculates the required amount of sorbent needed to eliminate a spill of a specified scale.

The third chapter is devoted to the life cycle assessment of oil sorbents in accordance with international standards ISO 14040 and ISO 14044. A generalized life cycle model – from production to disposal – is presented, and the main environmental impacts arising at each stage are identified and analyzed.

The fourth chapter considers existing methods of disposal and regeneration of used sorbents. The results of the life cycle assessment are interpreted, and recommendations are proposed for optimizing sorbent management in order to reduce environmental impact and increase resource efficiency.

The fifth chapter provides an economic assessment of the methods for disposing and regenerating polypropylene sorbents. The economic feasibility of various technologies is determined, and the cost-effectiveness of regeneration by low-temperature heating with recovery of secondary oil fraction is substantiated.

The sixth chapter outlines occupational safety requirements and safety measures when working with sorbents during oil spill response operations.

The qualification paper consists of an introduction, six chapters, conclusions, a list of references, and an appendix. The main content is presented on 106 pages of computer-typed text and includes 25 figures and 25 tables. The list of references contains 69 sources.

Keywords: oil sorbents, oil spills, spill containment, sorption, life cycle, sorbent disposal, regeneration, environmental assessment, economic efficiency.

ЗМІСТ

ВСТУП	8
РОЗДІЛ 1 ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ЗАСТОСУВАННЯ НАФТОВИХ СОРБЕНТІВ	11
1.1 Екологічні наслідки розливів нафти у водному середовищі	11
1.2 Засоби та методи локалізації і ліквідації розливів нафти на водній поверхні	18
1.3 Основи процесу сорбції	25
1.4 Класифікація та властивості нафтових сорбентів	27
РОЗДІЛ 2 ТЕХНОЛОГІЯ ЛОКАЛІЗАЦІЇ АВАРІЙНОГО РОЗЛИВУ НАФТИ І НАФТОПРОДУКТІВ НА ВОДНОМУ ОБ'ЄКТІ ІЗ ЗАСТОСУВАННЯМ СОРБЕНТІВ	36
2.1 Технологія локалізації аварійного розливу нафтопродуктів на водному об'єкті із застосуванням сорбентів	36
2.2 Розрахунок необхідної кількості сорбенту для ліквідації розливу нафтопродукту	45
РОЗДІЛ 3 АНАЛІЗ ЖИТТЄВОГО ЦИКЛУ НАФТОВИХ СОРБЕНТІВ ...	49
3.1 Методологія оцінки життєвого циклу: основні принципи, етапи та міжнародні стандарти	49
3.2 Узагальнена модель життєвого циклу сорбенту нафти	52
3.3 Стадія виробництва.....	54
3.4 Стадія використання сорбентів	66
РОЗДІЛ 4 ЕТАП УТИЛІЗАЦІЇ ТА РЕГЕНЕРАЦІЇ ВИКОРИСТАНИХ СОРБЕНТІВ ТА ІНТЕРПРЕТАЦІЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ОЦІНКИ ЖИТТЄВОГО ЦИКЛУ	73
4.1 Методи утилізації та регенерації використаних сорбентів нафти ...	73
4.2 Порівняльний аналіз та екологічні аспекти використання відпрацьованих нафтових сорбентів в енергетичних цілях (спалювання)	81

4.3 Інтерпретація результатів оцінки життєвого циклу та пропозиції щодо його оптимізації	84
РОЗДІЛ 5 ЕКОНОМІЧНА ОЦІНКА МЕТОДІВ УТИЛІЗАЦІЇ ТА РЕГЕНЕРАЦІЇ ВИКОРИСТАНИХ СОРБЕНТІВ НАФТИ	90
5.1 Економічна доцільність методів утилізації та регенерації сорбентів нафти	90
5.2 Техніко-економічне обґрунтування регенерації поліпропіленового сорбенту методом низькотемпературного нагрівання	94
РОЗДІЛ 6 ОХОРОНА ПРАЦІ	96
6.1 Загальні положення охорони праці	96
6.2 Аналіз небезпечних та шкідливих виробничих факторів	98
6.3 Ймовірність розливів нафти при аваріях суден	100
6.4 Вимоги техніки безпеки при використанні сорбентів під час ліквідації розливів нафти і нафтопродуктів	101
ВИСНОВКИ	105
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	107
ДОДАТОК	114

ВСТУП

Актуальність теми. Проблема забруднення водного середовища нафтопродуктами є однією з найгостріших екологічних загроз сучасності. Аварійні розливи нафти в морських та прісноводних екосистемах призводять до значного порушення біорізноманіття, деградації водних ресурсів, погіршення якості життя прибережного населення та завдають суттєвих економічних збитків. У таких умовах сорбенти є одним із ключових засобів для локалізації та очищення акваторій від нафтозабруднень завдяки їх здатності швидко та ефективно поглинати нафту з водної поверхні.

Водночас широке використання нафтових сорбентів супроводжується накопиченням значної кількості відпрацьованих матеріалів, які потребують подальшої утилізації або регенерації. Нераціональне поводження з ними може спричинити вторинне забруднення навколишнього середовища. У зв'язку з цим надзвичайно актуальним є комплексне вивчення всіх етапів «життя» сорбенту – від виробництва до утилізації – з метою оцінки його екологічного сліду та оптимізації систем очищення.

Методологія оцінки життєвого циклу дає змогу кількісно оцінити сукупний вплив сорбентів на довкілля, виявити «критичні точки» найбільшого навантаження, порівняти альтернативні рішення (наприклад, регенерація або утилізація) та приймати обґрунтовані рішення щодо впровадження більш сталих технологій. Проведення оцінки життєвого циклу нафтових сорбентів саме в контексті ліквідації розливів у водному середовищі дозволяє оцінити не лише ефективність реагування, а й довгострокові наслідки для природи й економіки.

Отже, дослідження оцінки життєвого циклу нафтових сорбентів є вкрай актуальним як з точки зору охорони водного середовища, так і в контексті реалізації принципів циркулярної економіки, екологічної безпеки та сталого розвитку.

Метою кваліфікаційної роботи є проведення комплексної оцінки життєвого циклу сорбентів, що застосовуються для ліквідації розливів нафти у водному середовищі, з урахуванням стадій їх виробництва, транспортування, використання та утилізації для обґрунтування екологічно доцільних шляхів поводження з ними.

Для досягнення мети магістерської роботи було поставлено такі **завдання:**

- проаналізувати екологічні наслідки розливів нафти у водному середовищі та дослідити сучасні засоби та методи локалізації розливів нафти;
- обґрунтувати технологію локалізації аварійного розливу нафтопродуктів на водному об'єкті із використанням сорбентів та розробити послідовність операцій з їх застосування;
- виконати розрахунок необхідної кількості сорбенту для ліквідації розливу нафтопродуктів з урахуванням фізико-хімічних характеристик забруднення;
- проаналізувати життєвий цикл нафтових сорбентів на основі методології LCA відповідно до міжнародних стандартів (ISO 14040/14044) та побудувати узагальнену модель життєвого циклу;
- дослідити стадії виробництва та використання сорбентів, визначити основні джерела екологічних впливів на кожному етапі;
- оцінити та порівняти методи утилізації та регенерації використаних сорбентів, визначити їх екологічну та технологічну доцільність;
- інтерпретувати результати оцінки життєвого циклу та розробити практичні рекомендації щодо оптимізації життєвого циклу сорбентів нафти;
- виконати економічну оцінку методів утилізації та регенерації сорбентів та визначити найбільш доцільні технологічні рішення;
- розробити заходи з охорони праці та техніки безпеки при роботі із сорбентами в умовах ліквідації розливів нафти.

Об'єкт дослідження – система життєвого циклу сорбентів, які використовуються для очищення забруднень водного середовища нафтою та нафтопродуктами.

Предмет дослідження – екологічні впливи та ресурсні витрати на різних етапах життєвого циклу нафтових сорбентів, зокрема під час їх виробництва, використання, регенерації та утилізації, а також їхнє порівняння в рамках методології оцінки життєвого циклу.

У процесі виконання кваліфікаційної роботи було використано комплекс наукових методів, що забезпечують системний підхід до оцінки життєвого циклу нафтових сорбентів:

- метод аналізу літературних джерел – для вивчення сучасного стану досліджень у сфері сорбційних матеріалів та методів ліквідації нафтозабруднень у водному середовищі;
- класифікаційно-аналітичний метод – для порівняння типів сорбентів за матеріалами, джерелом походження, сорбційною ємністю та придатністю до регенерації;
- методологія оцінки життєвого циклу відповідно до стандартів ISO 14040 та ISO 14044 – для ідентифікації та кількісної оцінки впливу сорбентів на навколишнє середовище на всіх етапах їх життєвого циклу;
- порівняльний аналіз – для оцінки ефективності та екологічної доцільності використання різних типів нафтових сорбентів.

Практична значущість даної роботи полягає в розробці обґрунтованих підходів до екологічно безпечного управління сорбентами, які використовуються для ліквідації розливів нафти у водному середовищі.

РОЗДІЛ 1

ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ЗАСТОСУВАННЯ НАФТОВИХ СОРБЕНТІВ

1.1 Екологічні наслідки розливів нафти у водному середовищі

Нафтопродукти у водойми потрапляють у ході природних (природних) процесів і внаслідок людської діяльності. Всупереч поширеній думці, аварійні розливи, спричинені видобутком та транспортуванням, не є головним джерелом забруднення води нафтою.

Перший за значимістю (близько 50%) канал надходження нафти гідросферу має природне походження і пояснюється переважно її виходом з розломів морського дна. Природні забруднення води нафтопродуктами притаманні регіонам, де зосереджені нафтогазові басейни. Під час вулканічної діяльності чи зсувів тектонічних плит вивільняються поклади нафти, утворюються міграційні нафтові потоки.

Другий за величиною негативний внесок у забруднення водних ресурсів роблять морські перевезення. Судна скидають баластові води, очищають резервуари, нелегально позбавляються судових нафтових відходів. Також не рідкі аварійні ситуації під час транспортування нафти морем. Наземне джерело вуглеводів – це річки, озера та інші водойми, в які потрапляють води, забруднені стоками: підприємств; комунальних господарств; берегових об'єктів, пов'язаних із споживанням, зберіганням, переробкою нафти.

До 10% нафтопродуктів потрапляє у моря та океани саме з суші. Ще 10% нафтопродуктів випадають у воду з атмосфери, що забруднюється транспортними засобами та промисловими підприємствами.

Антропогенні причини, через які до водойм потрапляє нафта, численні. Але майже завжди це є результатом людської безвідповідальності. Нижче наведено, чим може бути викликане забруднення води нафтою та нафтопродуктами.

Недосконалі технології транспортування сировини.

Нафтопродукти виливаються у воду з танкерів та підводних трубопроводів. Невеликі обсяги нафти, що пролилася, людина швидко ліквідує, але проблема полягає в тому, що в місцях нафтовидобутку і шляхом транспортування нафти виникають стійкі нафтові плівки, яких не просто позбудеться.

Аварії. Великі аварії техногенного характеру трапляються не часто, але завжди завдають природі колосальних збитків. Аварійні викиди найчастіше трапляються у місцях зберігання великих обсягів пально-мастильних матеріалів, у системах приготування рідких реагентів та бурових розчинів.

Великі аварії, коли нафту виливають фонтаном, виникають: у процесі обладнання свердловини; під час випробування експлуатаційних колон на герметичність; у момент демонтажу установки.

Іноді аварії відбуваються за порушення цілісності трубопроводу в момент незаконного врізання.

Буріння свердловин. При порушенні технології буріння нафта витікає у довкілля:

- у вигляді фонтану разом із буровим розчином;
- при проривах у водоносні пласти;
- у складі нафтових шламів;
- у складі пластових вод.

Разом із дощовими, талими, стічними водами нафтопродукти йдуть у річкову мережу, а далі – у світовий океан.

Таким чином, джерела надходження нафти та нафтопродуктів у водні об'єкти різноманітні та пов'язані з різними людськими факторами (табл. 1.1).

Таблиця 1.1. Джерела надходження нафти та нафтопродуктів у водні об'єкти

№	Джерело надходження нафти та нафтопродуктів	Пояснення
1	Аварії на морських та річних судах	Розлив нафти внаслідок зіткнення, аварій, утоплень танкерів. Порушення якості паливних баків суден. Скидання частинок нафтопродуктів або баластових вод.
2	Промислові підприємства	Зливних забруднених стоків підприємств нафтопереробки та нафтохімічної промисловості. Витік нафти та нафтопродуктів із територій заводів через несправне обладнання.
3	Нафтопроводи	Витоку та аварії на нафтопроводах, що проходять через водні об'єкти або в їх близькості. Корозія трубопроводів, порушення герметичності з'єднань.
4	Шельфові розробки	Розливи нафти під час видобутку, транспортування та переробки на морських платформах. Аварійні викиди під час буріння свердловин або їх герметизації.
5	Стічні води	Водовідведення з нафтосховищ та автозаправних режимів. Змив забруднень зі складними дорогами та територіями, де використовується техніка для роботи з нафтопродуктами.
6	Побутові та сільськогосподарські джерела.	Забруднення річки та озера через скиди європейських домогосподарств чи фермерських господарств. Використання нафтопродуктів як паливо для сільгосптехніки.
7	Природні процеси	Природні викиди нафти із підводних місць народження чи виникнення розломів. Руйнування берегової лінії, де нафта присутня у породах.
8	Військові дії та терористичні дії	Умисні розливи нафти до створення екологічних катастроф. Руйнівні роботи, пов'язані з транспортуванням та запасами нафти.

Вплив на водне середовище розливу нафти визначається специфікою його поведінки. Поведінка нафтових розливів визначається як фізико-хімічними властивостями нафти, і гідрометеорологічними умовами середовища. При попаданні нафти у водне середовище поведінка нафтової плями визначається такими основними механізмами, що представлені на рис. 1.1.



Рис. 1.1. Основні механізми поведінки нафтового розливу у водному середовищі

Аварійні розливи нафти та нафтопродуктів у водному середовищі є однією з найнебезпечніших форм техногенного забруднення, що завдає значної шкоди як природним екосистемам, так і соціально-економічному добробуту прибережних територій. Основна загроза полягає в тому, що навіть відносно невеликі за обсягом викиди нафти можуть спричинити довготривалі негативні наслідки для морської флори та фауни через токсичну, фізико-хімічну та механічну дію вуглеводнів.

У перші години після розливу нафтові фракції починають взаємодіяти з водою, повітрям, сонячним світлом, утворюючи токсичні сполуки, що погіршують якість водного середовища. Легкі фракції швидко випаровуються, забруднюючи атмосферу, тоді як важкі компоненти утворюють плівку на поверхні води або опускаються на дно, забруднюючи донні відкладення. Така плівка порушує газообмін між водою та атмосферою, знижуючи концентрацію кисню, що призводить до гіпоксії водних організмів.

Особливо вразливими до нафтового забруднення є морські птахи, ссавці, планктон, молюски та риби. Нафта, що потрапляє на пір'я птахів, руйнує його водовідштовхувальні властивості, спричиняє переохолодження, втрату плавучості та загибель. Морські ссавці, зокрема дельфіни та тюлені, зазнають токсичної дії при вдиханні випарів або поглинанні забрудненої води. Довготривале накопичення нафтопродуктів у харчовому ланцюзі призводить до біомагніфікації – поступового накопичення токсичних речовин в організмах вищих трофічних рівнів.

Окрім біологічного впливу, розливи нафти у водному середовищі створюють серйозні загрози економіці. Вони негативно впливають на рибальство, аквакультуру, туризм, рекреацію та судноплавство. За оцінками Міжнародної морської організації (ІМО), великі аварійні розливи нафти можуть спричинити збитки на мільйони доларів, а екологічне відновлення триває роками (табл. 1.2, рис. 1.2).



Рис. 1.2. Небезпека нафтових забруднень для живих організмів

Таблиця 1.2. Екологічні наслідки розливів нафти у водному середовищі

Категорія впливу	Характеристика наслідків
Фізико-хімічні порушення	Утворення нафтової плівки на поверхні води, зниження кисневого обміну, зменшення прозорості
Біологічне забруднення	Гибель планктону, бентосу, риб, моллюсків; порушення біоценозів; зниження біорізноманіття
Вплив на птахів і ссавців	Порушення теплоізоляції пір'я і хутра, отруєння через контакт чи інгаляцію, масова загибель
Токсичність для гідробіонтів	Акумуляція токсичних сполук у тканинах; біомагніфікація через харчовий ланцюг
Порушення донних екосистем	Осідання важких фракцій нафти; забруднення донних відкладень; довгострокове ураження середовища
Атмосферне забруднення	Випаровування летких фракцій нафти; утворення шкідливих аерозолів
Соціально-економічні наслідки	Збитки рибній галузі, туризму, транспорту; витрати на ліквідацію аварії; репутаційні втрати
Довгострокові ефекти	Тривале забруднення територій, які неможливо повністю очистити; відновлення екосистем роками

Екологічні наслідки розливів нафти у водному середовищі значною мірою залежать від сукупності фізичних, хімічних, біологічних і техногенних факторів, які визначають масштаб впливу, ступінь ураження екосистем і тривалість процесу відновлення природного балансу. Розуміння цих факторів є ключовим для розробки ефективних стратегій реагування та мінімізації шкоди довкіллю.

1. Тип і властивості нафти або нафтопродуктів. Хімічний склад нафти визначає її поведінку у водному середовищі та токсичність. Легкі фракції (бензин, дизельне паливо) швидко випаровуються та легко диспергуються, однак можуть викликати гостру токсичність для водних організмів. Важкі сорти нафти (мазут, бітум) утворюють стійкі плівки на поверхні води, осідають на дно і мають тривалий вплив, ускладнюючи очищення. В'язкість, щільність, температура спалаху та вміст сірки – всі ці параметри впливають на характер поширення забруднення.

2. Обсяг розливу та тривалість витоків. Чим більший обсяг розлитої нафти, тим ширший масштаб її поширення і серйозніші наслідки. Постійний витік упродовж кількох годин чи діб значно ускладнює ліквідацію аварії та призводить до глибшого проникнення нафтопродуктів у водні шари та донні відкладення. Одноразовий розлив великої кількості нафти також може спричинити миттєву катастрофу для місцевої біоти.

3. Умови середовища (температура, солоність, хвильовий режим). Температура води впливає на в'язкість нафти: у холодних водах вона загусає швидше, що ускладнює її розтікання, але водночас ускладнює і її збирання. Солоність впливає на взаємодію нафти з водою та диспергування. Вітрові та хвильові умови можуть сприяти або, навпаки, перешкоджати локалізації нафтової плями. У спокійній воді нафта повільніше поширюється, але довше зберігається в локальних осередках.

4. Глибина і характер акваторії. У відкритому морі нафта швидко розповсюджується, але її вплив менш локалізований. У закритих бухтах, гирлах річок, естуаріях і портах розливи є більш небезпечними: тут сповільнена циркуляція води сприяє накопиченню нафти, а біорізноманіття таких зон зазвичай дуже високе. Глибина водойми впливає на швидкість осідання частинок і накопичення важких фракцій на дні.

5. Біологічні особливості регіону. Екосистеми з високою чутливістю (наприклад, коралові рифи, нерестилища риб, зони міграції птахів) зазнають значно більших втрат. Уразливість залежить від сезону: під час нересту, міграції або розмноження вплив розливів нафти особливо критичний. Крім того, деякі види організмів мають високу чутливість до навіть низьких концентрацій вуглеводнів.

6. Оперативність та технологічна ефективність реагування. Швидкість виявлення та ліквідації розливу визначає масштаб його впливу. Застосування сучасних сорбентів, бонів, скімерів, біоагентів і автоматизованих систем контролю дозволяє мінімізувати наслідки. Проте в умовах складного рельєфу, віддаленості або несприятливої погоди реагування може

затримуватись, що значно посилює екологічну шкоду.

7. Людський фактор та порушення регламентів. Неналежне технічне обслуговування обладнання, ігнорування правил транспортування та поводження з нафтою, несвоєчасне реагування на аварійні ситуації або їх приховування призводять до значного поглиблення екологічної ситуації.

Таким чином, характер та тривалість наслідків нафтових розливів залежать від комбінації природних умов, технічних характеристик речовини, екологічної цінності зони та організації реагування. Урахування цих факторів є критично важливим для прогнозування ризиків, вибору технологій ліквідації забруднення та побудови ефективних моделей оцінки екологічного навантаження, зокрема в межах аналізу життєвого циклу нафтових сорбентів.

1.2 Засоби та методи локалізації і ліквідації розливів нафти на водній поверхні

Локалізація розливів нафти є ключовим етапом у системі ліквідації аварійних нафтових забруднень, оскільки своєчасне обмеження зони поширення нафти дозволяє значно зменшити масштаби екологічного впливу. Ефективна локалізація дає змогу зосередити нафтову пляму в межах контрольованої зони, запобігти її поширенню на прибережні екосистеми, інфраструктурні об'єкти та знизити ризик вторинного забруднення. Залежно від умов розливу (обсяг, тип нафти, хвильовий режим, температура, швидкість течії) застосовуються різні технічні засоби та методи.

Боніві загородження. Бони – це плаваючі бар'єри, які розміщуються на поверхні води навколо нафтової плями для її ізоляції. Вони мають надводну і підводну частину, що дозволяє стримувати як поверхневу нафту, так і частки, що знаходяться у верхньому шарі води. Бони можуть бути:

- пасивні (статичні) – встановлюються стаціонарно в спокійних умовах (порти, затоки);
- активні (з гнучкими секціями, хвильостійкі) – використовуються на відкритих акваторіях і при наявності хвиль або течій;

- протоконтинентальні – з можливістю перенесення й швидкого розгортання під час аварій.

Бонові загородження забезпечують оперативність розгортання (бони здатні повністю перегородити річку за 2-3 хвилини). Бонові загородження, що впливають, забезпечують ефективну локалізацію і збір нафти в акваторії портів, водосховищах, озерах, річках, тим самим представляють надійний захист (рис. 1.3).

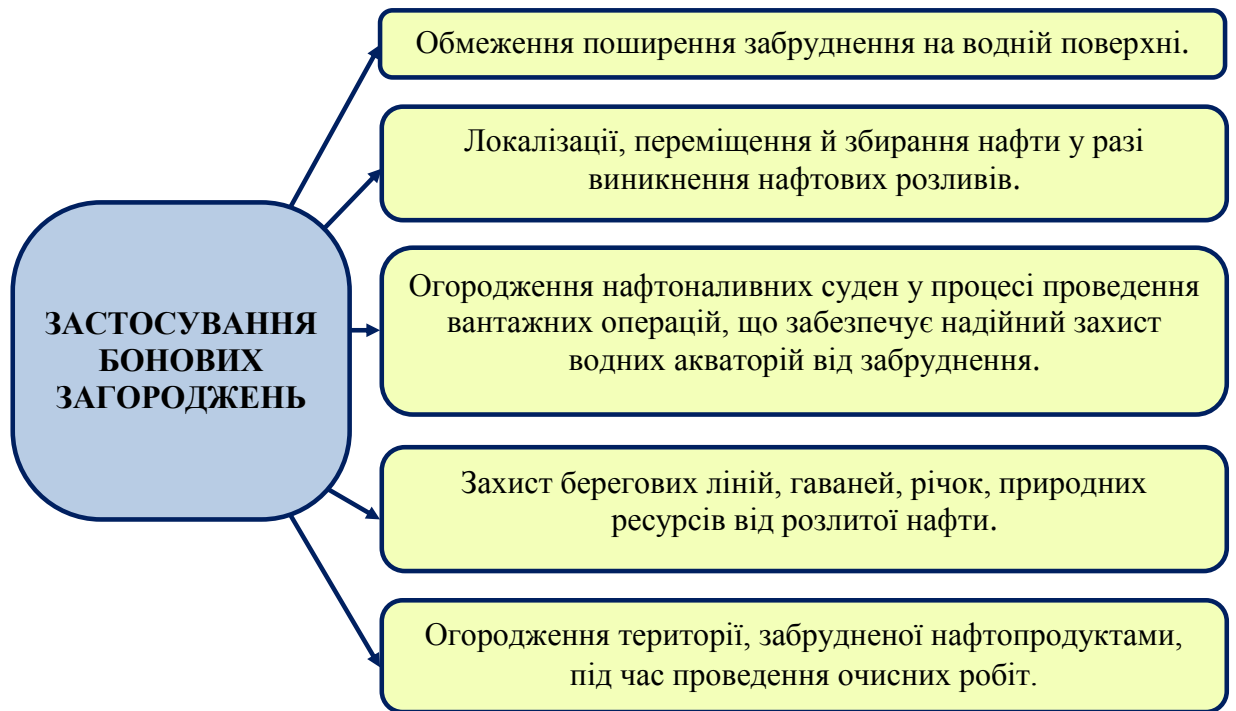


Рис. 1.3. Напрями застосування бонових загороджень

Бони сорбційні – утримують нафтову плівку, сорбують при незначних швидкостях перебігу та вітру. Вогнестійкі бони застосовуються для локалізації нафтового розливу, потовщення шару нафти з метою подальшого підпалу і спалювання.

Характеристики бонових загороджень :

- стандартні діаметри 1,4, 1,8 та 2,4 м, довжина – 25 м;
- портативні сегменти бар'єра мають природну еластичність. характеризуються легкою вагою, легко надуваються, здуваються та переміщуються з місця на місце;

- бар'єри з'єднуються один з одним за допомогою кріпильних петель для морських умов, швидкозатискних з'єднань та/або пластин затвора, утворюючи структуру практично будь-якої довжини або конфігурації;

- низьке занурення зменшує ризик проростання морської рослинності, дозволяє легко контролювати ворота та забезпечує максимальну висоту бар'єру;

- матеріал – прогумована тканина, розроблена спеціально для цієї мети. Характеризується високою стійкістю до стирання, розриву, впливу ультрафіолету та озону, що забезпечує передбачуваний термін експлуатації понад 20 років;

- розраховані на високу інтенсивність зіткнень. Стійкі до малокаліберної вогнепальної зброї (рис. 1.4, рис. 1.5).

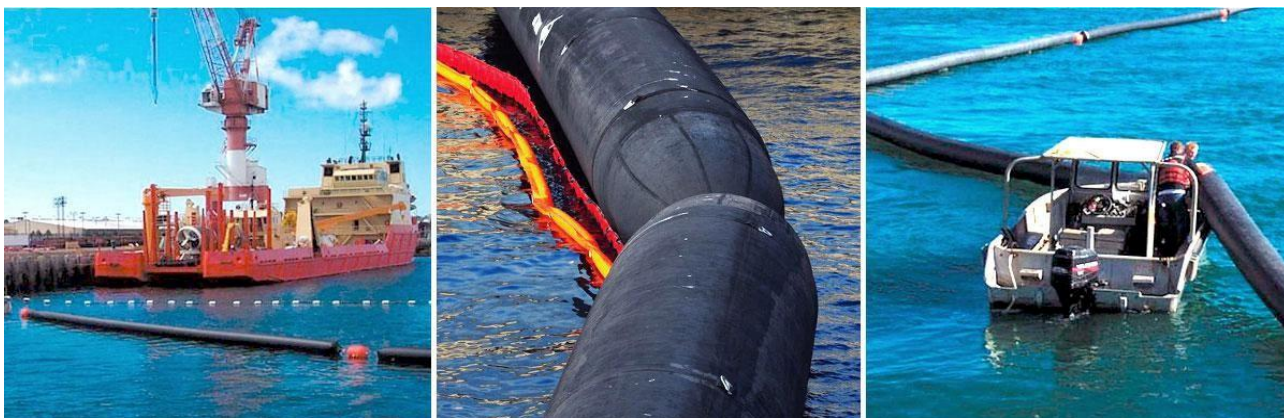
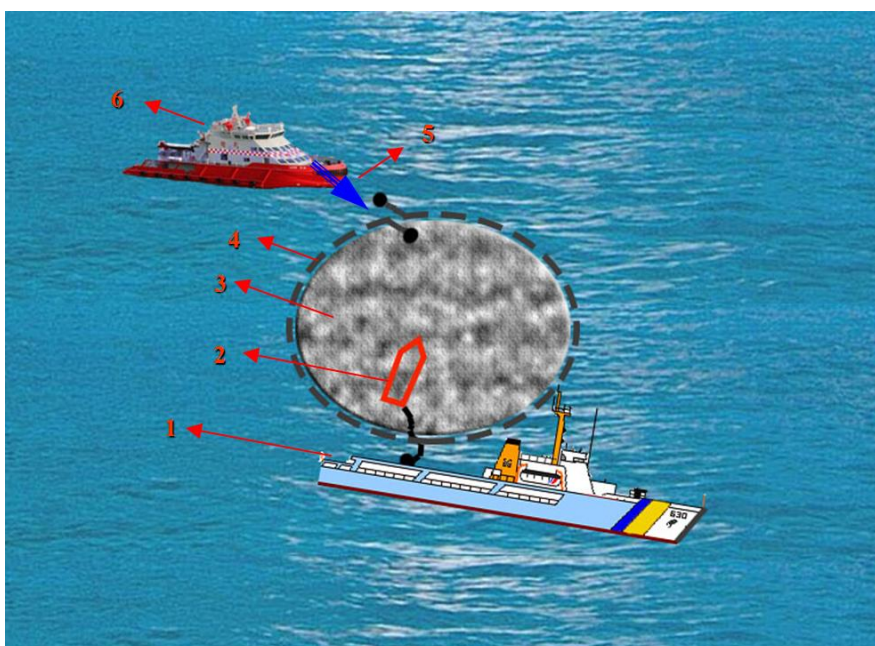


Рис. 1.4. Зовнішній вигляд бонових загороджень



- 1 – танкер або нафтоналивна баржа;
- 2 – нафтосміттезбірник;
- 3 – нафтова пляма;
- 4 – оперативні боніві загородження;
- 5 – струмінь води з пожежного стволу;
- 6 – пожежний катер.

Рис. 1.5. Локалізація розливу нафти на акваторії морського порту

Основною перевагою бонів є їхня простота у використанні та можливість швидкої мобілізації. Проте в умовах сильної течії або шторму їх ефективність значно знижується.

Скімери (збирачі нафти). Скімери – це механічні пристрої, які дозволяють відокремлювати нафту від поверхні води. Вони працюють за принципом гравітаційного, вакуумного, дискового або щілинного збору. Скімери можуть бути стаціонарними або мобільними, автономними або встановленими на судах. Основні типи:

- дискові/щілинні скімери – обертові диски/барабани збирають нафту з поверхні;
- вакуумні скімери – засмоктують нафту насосом;
- пояскові скімери – використовують стрічку, що занурюється в нафтову плівку.

Скімери застосовуються після локалізації плями бонами. Їх ефективність залежить від в'язкості нафти, хвильового режиму та швидкості розливу.

Принцип дії скімера розглянемо на прикладі дискового скімера XENA, виробництва української компанії «ЕКОНАД», яка розробляє та впроваджує природоохоронні технології, спрямовані на захист навколишнього природного середовища від нафтових забруднень. Дисковий скімер XENA – це плавуче пристосування для збору нафти і нафтопродуктів різного ступеня в'язкості з поверхні води. Можливий збір як нафтопродуктів, так і органічних масел [4] (рис. 1.6).

Принцип дії дискового скімеру моделі XENA наступний. Нафтопродукти налипають на зовнішню поверхню обертового барабана або дисків, які сконструйовані з ПВХ матеріалу, алюмінію або сталі. Диски обертаються завдяки гідравлічному (або електро-) мотору. Потім нафтопродукти механічно знімаються за допомогою скребків. З маслосбірника зібрані забруднення відкачуються насосом розташованим на березі або на судні. У комплект може входити стріла з загороджувальними бонами [4].

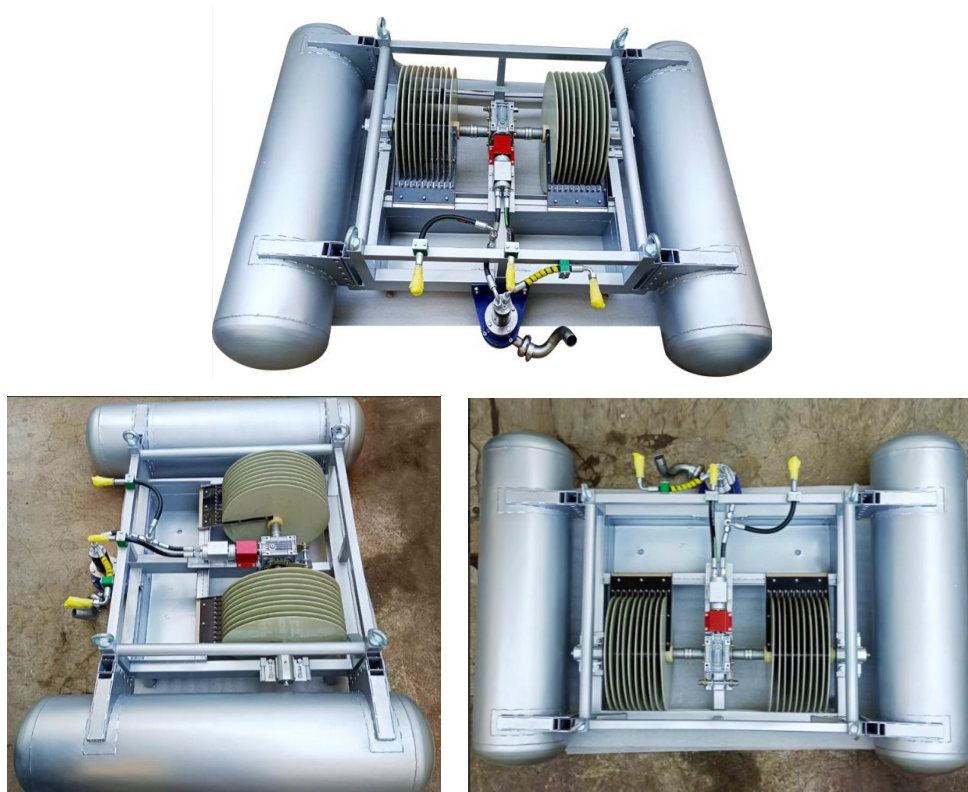


Рис. 1.6. Дисковий скімер XENA [4]

Хімічні диспергатори. Ці речовини знижують поверхневий натяг нафти, розщеплюючи її на дрібні краплі, які розподіляються у водному стовпі. Хоча диспергатори дозволяють швидко зменшити видимі прояви розливу, вони викликають додаткове навантаження на екосистему, особливо через утворення емульсій, токсичних для морської флори і фауни. Вони є дієвими при роботі у відкритому морі та за наявності значного обсягу розливу. Проте важливо враховувати їхню потенційну токсичність, що обмежує використання в екологічно чутливих зонах. Застосування таких засобів вимагає особливого контролю та погодження з екологічними органами.

Сорбційні матеріали. Сорбенти застосовуються для поглинання нафти з поверхні води після її локалізації. Вони широко використовуються на практиці завдяки здатності ефективно поглинати нафту. Вони можуть мати різну форму (гранули, рулони, мати, подушки) і виготовляються з природних, синтетичних або біосировин. Їх обирають залежно від умов застосування та типу забруднення. Ефективність сорбції залежить від пористості матеріалу, його

гідрофобності та олеофільності. Перевагою є універсальність і доступність, проте їх застосування супроводжується утворенням великого обсягу відпрацьованого матеріалу, який потребує утилізації або регенерації.

Пінні, гелеві та полімерні загородження. Сучасні розробки включають пінополімерні системи, що створюють тимчасовий бар'єр на поверхні води для утримання нафти. Також застосовуються гелеві структури, які захоплюють нафту в умовах сильного хвилювання.

Біологічні методи. Біоінженерні підходи передбачають використання мікроорганізмів, здатних розкладати вуглеводні, як додатковий або завершальний етап очищення після збору нафти. Їх застосування потребує ретельного підбору штамів та контролю умов середовища. Вони є екологічно безпечними та перспективними в контексті сталого розвитку, проте діють повільно й потребують контролю зовнішніх умов (температури, рН, концентрації кисню тощо).

Спалювання нафтопродуктів на водній поверхні – це метод ліквідації розливів нафти, який передбачає контрольоване підпалювання нафтової плями безпосередньо на місці аварії. Такий метод сприяє швидкому зменшенню об'єму розлитої нафти, запобіганню подальшому поширенню плями та забрудненню берегової лінії. Спалювання використовується у важкодоступних районах, де механічний збір малоефективний (льодові умови, сильні течії).

Перевагами такого методу є: висока ефективність - можна видалити до 90% нафти за короткий час; швидкість реагування – спалювання починається одразу після встановлення бонів; мінімальна потреба у техніці; зменшення кількості відходів (практично немає потреби в подальшій утилізації зібраної нафти).

Для застосування методу спалювання нафтової плями на воді потрібні належні погодні та гідрологічні умови (низький вітер, невеликі хвилі), необхідність забезпечення товщини нафтового шару не менше ніж 2–3 мм; обмежене застосування поблизу населених територій та екосистем, чутливих до диму. Також виникають екологічні загрози, такі як : утворення диму та

токсичних продуктів горіння, що може впливати на повітряне середовище; ризики для безпеки: висока температура та можливість неконтрольованого поширення вогню.

Оптимальна стратегія реагування зазвичай включає комбінацію кількох засобів, залежно від типу розливу, його масштабу та особливостей акваторії. Особливу увагу слід приділяти екологічним і технологічним характеристикам обраних матеріалів. Існує певна послідовність використання різних методів і засобів ліквідації розливів нафти і нафтопродуктів (рис. 1.7). Ефективність кожного засобу зростає при його інтеграції в загальну систему реагування.

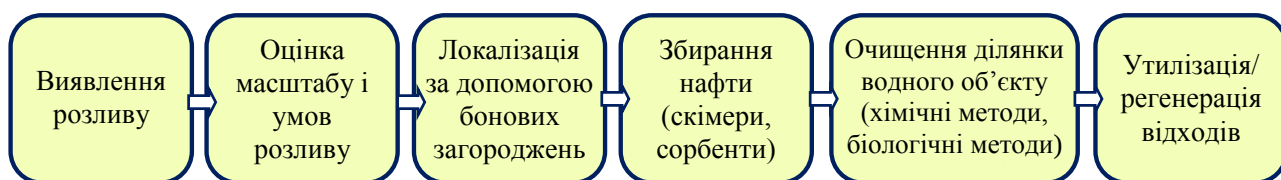


Рис. 1.7. Послідовність реагування на розливи нафти і нафтопродуктів на водних об'єктах

Кожен з перелічених методів має свої сильні й слабкі сторони. У табл. 1.3 представлено порівняльний аналіз основних методів локалізації та ліквідації нафтових розливів у водному середовищі з урахуванням їхнього призначення, переваг і обмежень.

Таким чином, локалізація і ліквідація нафтових розливів потребує комбінації технічних, хімічних та біологічних методів залежно від умов аварії. Традиційні методи, як-от механічне збирання, біодеградація, диспергування та спалювання, мають низку обмежень, особливо в умовах шторму, низьких температур або великої площі забруднення. Використання сорбентів є одним із найпоширеніших методів, що дозволяє не лише локалізувати нафту, а й зменшити її розповсюдження. Саме тому питання оптимального вибору сорбційного матеріалу та управління його життєвим циклом є надзвичайно важливим у межах концепції сталого розвитку та екологічної безпеки.

Таблиця 1.3. Порівняння методів і засобів локалізації і ліквідації розливів нафти на воді

Метод / Засіб	Призначення	Переваги	Обмеження
Бонові загородження	Локалізація плями	Швидке розгортання, простота використання	Ефективність знижується при сильних течіях і штормі
Скімери	Механічне збирання нафти	Точне збирання, підходить для великих обсягів	Висока вартість, чутливі до хвиль і типу нафти
Сорбційні матеріали	Поглинання нафти	Висока ефективність, різноманітність форм, можливість регенерації	Утворення великої кількості відходів, потреба в збиранні
Хімічні диспергатори	Розщеплення нафти у воді	Швидке зменшення плями, ефективні в морі	Токсичність для біоти, заборона у прибережних зонах
Біологічні методи	Розклад залишкової нафти біоагентами	Екологічно дружні, можливе повне розкладання	Повільна дія, залежність від температури і рН
Спалювання нафти на водній поверхні	Швидке зменшення об'єму розлитої нафти (до 90%), запобігання подальшому поширенню плями	Висока ефективність. Мінімальна потреба у техніці. Відсутність відходів	Потрібні належні погодні та гідрологічні умови. Товщина нафтового шару $\geq 2-3$ мм. Утворення диму та токсичних продуктів горіння

1.3 Основи процесу сорбції

При ліквідації нафтових забруднень водної поверхні, перш за все, проводять локалізацію нафти, що розлилася, або нафтопродуктів бонами, що є обов'язковим за будь-якої технології очищення. Після цього виробляють збір нафти за допомогою всіляких конструкцій та пристроїв, а потім наносять сорбент на забруднену поверхню будь-яким механізованим або ручним способом до повного поглинання нафтової плівки та утворення плавучого конгломерату. Подальшою стадією є стягування бонового загородження для концентрації сорбенту з поглиненою нафтою поблизу місця, зручного для

збору, і тим чи іншим чином видаляють відпрацьований сорбент з поверхні води.

Резерв часу для локалізації нафтового розливу без істотних збитків навколишньому середовищу, залежно від погодних умов, зазвичай не повинен перевищувати 24-72 години з моменту аварії. Щоб як сорбент, матеріал повинен залучати нафту, не взаємодіючи з водою, тобто. бути олеофобним і водночас гідрофобним. Сорбенти можуть діяти за принципом адсорбції (поверхневого поглинання) або, рідше сорбції, нафту за принципом абсорбції (всмоктування). При адсорбції вибірково притягується до поверхні речовини, у той час як абсорбенти вбирають нафту або іншу видалюється. Більшість продуктів, які пропонуються для усунення розливів нафти, є адсорбентами, і деякі з них є істинними абсорбентами (рис. 1.8).

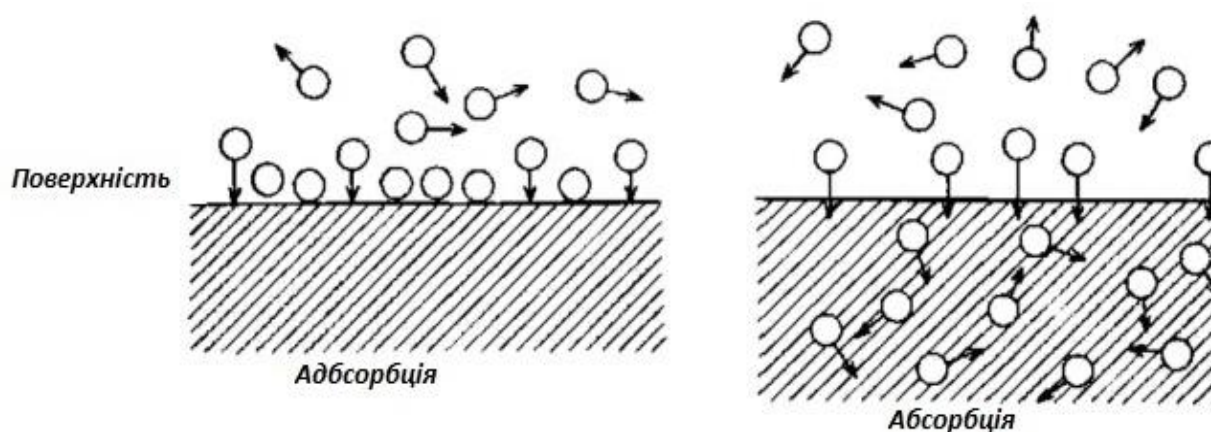


Рис. 1.8 Порівняння адсорбції та абсорбції

Для успішної адсорбції нафту можна поширювати змочувати матеріал, і, отже, поширюватися на його поверхні на перевагу воді. Рідина змочує тверду речовину, якщо коефіцієнт її поверхневого натягу менший за критичний коефіцієнт з молекулами іншого. Дія сорбентів ґрунтується як на адгезії нафти до поверхні сорбенту, так і на когезійних властивостях нафти, які дозволяють великій кількості нафти утримуватись сорбентом. Якщо сорбент має форму пасм з розпущених ниток, нафти серед елементів сорбенту може сприяти утворенню застиглої маси, яка уповільнює поширення нафти та полегшує збирання суміші нафти та сорбенту. Когезія вища у більш в'язких

нафтопродуктів. У деяких матеріалів адсорбція відбувається за допомогою капілярної дії. У той час як воно залежить від відносного поверхневого натягу твердої речовини та рідини, в'язкість нафти також має значний вплив на швидкість проникнення до структури сорбенту. Швидкість проникнення нафти може бути високою (близько кількох секунд для малов'язких нафтопродуктів, таких як легка нафта або низькою (кілька годин) до зневажливо низькою для високов'язких нафтопродуктів, таких як важка паливна нафта або вивітрілі нафтопродукти. Капілярна дія особливо важлива для синтетичних сорбентів.

1.4 Класифікація та властивості нафтових сорбентів

Нафтові сорбенти є одним з основних засобів для ліквідації розливів нафти та нафтопродуктів у водному середовищі, особливо в прибережних зонах, портах, закритих бухтах і важкодоступних місцях. Ефективність реагування на аварійні ситуації значною мірою залежить від правильного вибору типу сорбенту, його фізико-хімічних властивостей, ступеня екологічної безпеки та можливостей повторного використання або утилізації. У зв'язку з цим актуальним є аналіз класифікації сорбентів та характеристика їхніх основних властивостей.

Залежно від походження, матеріалів та технології виготовлення нафтові сорбенти класифікуються на кілька основних груп:

1. За походженням:

- неорганічні сорбенти, які поділяються на природні матеріали (природні мінерали і гірські породи: діатоміти (кізельгур), різні види глин, пісок, пемза, туфи, цеоліти, графіт) та штучні мінерали і матеріали (перліт, керамзит, силікагель, скловата);
- органічні сорбенти – виготовляються з природних матеріалів, таких як торф, солома, мох, целюлоза, шкаралупа кокосів тощо. Їх перевага – екологічність та доступність, але вони можуть мати нижчу сорбційну здатність порівняно з синтетичними аналогами;

- синтетичні сорбенти – виготовляються з полімерів (поліпропілен, поліуретан, поліетилен), пінопласту або волокнистих матеріалів. Вони характеризуються високою олеофільністю, водовідштовхувальними властивостями, великою питомою площею поверхні й високою механічною міцністю.

- комбіновані (композитні) – включають як природні, так і синтетичні компоненти. Наприклад, біополімерна матриця з вкрапленням полімерних мікрочастинок (табл. 1.4).

Таблиця 1.4. Переваги та недоліки різних типів сорбентів

Тип сорбенту	Сорбційний матеріал	Переваги	Недоліки
Органічні сорбенти	Солома, тирса, курячий пух, пір'я, зернове лушпиння, шкаралупа горіхів, листя, мох, бавовна, вовна, торф, вугілля	Можливість спалювання та біодеградації, а також здатність вбирати нафту від 5 до 15 разів перевищує вагу самого матеріалу.	Погана гідрофобність. Деякі сорбенти втрачають плавучість і призводять до вторинного забруднення водного об'єкта, тому виникає необхідність утримувати їх у сітках або мембранах.
Неорганічні сорбенти	Діатоміти, глина, пісок, пемза, туфи, цеоліт, перліт, керамзит, графіт	Значне використання мають діатоміти, глина, пісок, так як мають низьку вартість і можливість виробництва у великих обсягах. Здатність вбирати нафту від 4 до 20 разів перевищує вагу самого матеріалу.	З екологічної точки зору якість неорганічних сорбентів є не цілком прийнятною, вони можуть тонути у воді, що не вирішує проблеми очищення від забруднення. Вони не спалюються та не біодеградують. небезпечні для дихання, тому необхідно застосовувати засоби індивідуального захисту.

Тип сорбенту	Сорбційний матеріал	Переваги	Недоліки
Синтетичні сорбенти	Пінополіуретан, пінополістирол, поліпропілен, формальдегідна піна, синтепон	Мають високі нафтопоглинаючі властивості, досить прості у користуванні. Існує можливість їх повторного використання після механічного віджимання на спеціальних пристроях.	Після збирання нафти та нафтопродуктів вони можуть бути дуже важкими, що спричиняє труднощі при їх збиранні та транспортуванні, а також виникає складність їхньої подальшої утилізації.
Комбіновані (композитні) сорбенти	Торф-поліпропіленовий композит, целюлозно-каучуковий композит, біосорбент з водоростей + поліетиленова сітка	Підвищена сорбційна здатність, оптимальний баланс гідрофобності та олеофільності, покращена механічна міцність, зниження екологічного навантаження за рахунок природних компонентів.	Складність виробництва, так як комбінування різних матеріалів потребує спеціального обладнання та контрольованих умов. Це також збільшує собівартість. У разі неправильного змішування компонентів може виникати неоднорідність у структурі, що знижує ефективність сорбції. Змішані матеріали складніше утилізувати, ніж однотипні

2. За формою випуску:

- сипучі (гранули, порошки) – використовуються для розсипання на поверхню води або берегову зону;
- рулонні, матові, подушкові сорбенти – зручні для локалізації та збору нафти в зоні берегової лінії;
- сорбційні бони та рукави – поєднують властивості механічного бар'єру і сорбційної здатності (рис. 1.9), (додаток А).

3. За функціональним призначенням:

- одноразові сорбенти – підлягають утилізації після повного насичення нафтою.
- сорбенти з можливістю регенерації – допускають повторне використання після механічного стискання, термічного або хімічного очищення.



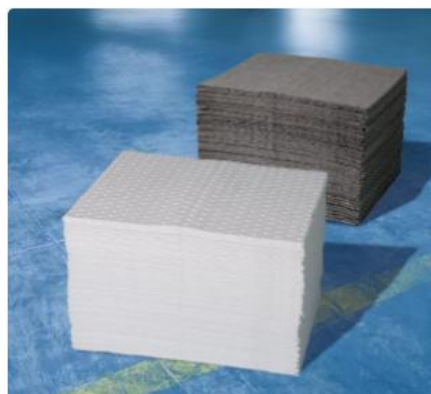
а)



б)



в)



г)

Рис. 1.9. Форми випуску сорбентів нафти: а – сорбуючий бон; б – сорбуюче полотно; в – подушка сорбуюча; г – серветки сорбуючі;

При виборі сорбенту для використання в конкретних умовах розливу враховують ряд технічних та екологічних характеристик, які наведені нижче.

Сорбційна ємність (г/г або л/л) – показує, скільки нафти сорбент може поглинути відносно власної маси або об'єму. Для поліпропіленових сорбентів цей показник становить 10–20 г нафти на 1 г матеріалу, для торфу – 5–10 г/г.

Олеофільність – здатність матеріалу притягувати нафту, є критично важливою при використанні у водному середовищі. Олеофільні сорбенти вибірково вбирають вуглеводні, відштовхуючи воду.

Гідрофобність – здатність не вбирати воду. Сильна гідрофобність підвищує ефективність сорбції саме нафти, особливо у випадках плаваючої плівки.

Плавучість – властивість залишатися на поверхні води навіть після насичення нафтою. Втрата плавучості призводить до осідання на дно, ускладнюючи збирання і створюючи ризики вторинного забруднення.

Механічна міцність – важлива при роботі з потоками, у штормових умовах або під час регенерації (відтискання, нагрівання тощо).

Біорозкладність – здатність до природного розпаду без утворення токсичних продуктів. Це критично для природних та біосорбентів, які використовуються у зонах підвищеної екологічної чутливості.

Можливість регенерації – здатність відновлювати сорбційні властивості після використання. Така властивість знижує кількість відходів і вартість експлуатації сорбенту.

Екологічність та безпека. Сорбент не повинен бути токсичним для людей, тварин, рослин та мікроорганізмів. Особливо це важливо при роботі в чутливих природних зонах. Використання безпечних матеріалів мінімізує додаткове негативне навантаження на екосистему.

Термін зберігання та умови використання. Сорбент повинен зберігати свої властивості протягом тривалого часу, будучи готовим до застосування у будь-який момент. Важливо також враховувати можливість його використання за різних температур, вологості та інших погодних умов.

Кожен тип сорбенту має свої переваги та обмеження, які обумовлюють доцільність його застосування в певних умовах. Порівняльна таблиця різних типів нафтових сорбентів (табл. 1.5) і графіки (рис. 1.10), створені за критеріями, що найчастіше враховуються при оцінці їх ефективності та екологічної доцільності. Під екологічною безпекою розуміється сумарна оцінка впливу на довкілля протягом усього життєвого циклу.

Найкращий баланс мають біосорбенти та торф'яні сорбенти – вони поєднують високу екологічну безпеку та середньо-високу ефективність. Синтетичні сорбенти (поліпропіленові, пінополіуретанові) мають дуже високу сорбційну здатність, але низькі показники екологічної безпеки. Целюлозні та

солом'яні сорбенти демонструють високу безпеку, але відносно низьку ефективність.

Таблиця 1.5. Порівняння деяких видів нафтових сорбентів за основними характеристиками

Тип сорбенту	Походження	Сорбційна ємність, г/г	Біороз- кладність	Можли- вість регенерації	Плавучість	Екологічна безпека
Торф'яний сорбент	Природний	Середня 5–10	Висока	Низька	Середня	Висока
Целюлозний	Природний	Середня 3-5	Висока	Низька	Низька	Висока
Солом'яний	Агровідходи	Низька– середня 4-6	Висока	Низька	Низька	Висока
Поліпропілено- вий	Синтетичний	Висока 10–40	Низька	Висока (до 5 циклів)	Висока	Середня– Низька
Пінополіурета- новий	Синтетичний	Висока 10-25	Низька	Висока	Висока	Середня
Комбінований (біосорбент +синтетичний)	Змішане	Висока 10-18	Залежно від складу	Висока	Висока	Вища за синте- тичні
Біосорбенти (водорості, хітин)	Біологічне	Середня –висока 8-15	Висока	Залежить від виду	Середня	Висока

Ефективний нафтосорбент повинен володіти плавучістю. В іншому випадку він затоне разом з поглиненою нафтою, яка, по-перше, пригнічуватиме донну біоту, а по-друге, за рахунок десорбції частина адсорбату поступово впливе і утворює вторинне плівкове забруднення. Здатність плавати мають сорбенти, що мають закриті пори, наповнені повітрям, а також сорбенти на основі гідрофобізованих матеріалів, поверхня пор яких не змочується водою і тому пори містять повітря. В останньому випадку після витіснення повітря з гідрофобних пір вуглеводнями сорбент тоне. Не втрачати плавучість матеріал повинен до завершення всіх операцій із очищення поверхні та збору насиченого нафтою сорбенту, тобто, кілька діб. Оскільки на поверхні більшості нафто сорбентів, крім гідрофобних ділянок, є і частка гідрофільних, ці матеріали

здатні крім нафти вбирати воду. Зрозуміло, що чим менше водопоглинання, тим ефективніше сорбент.

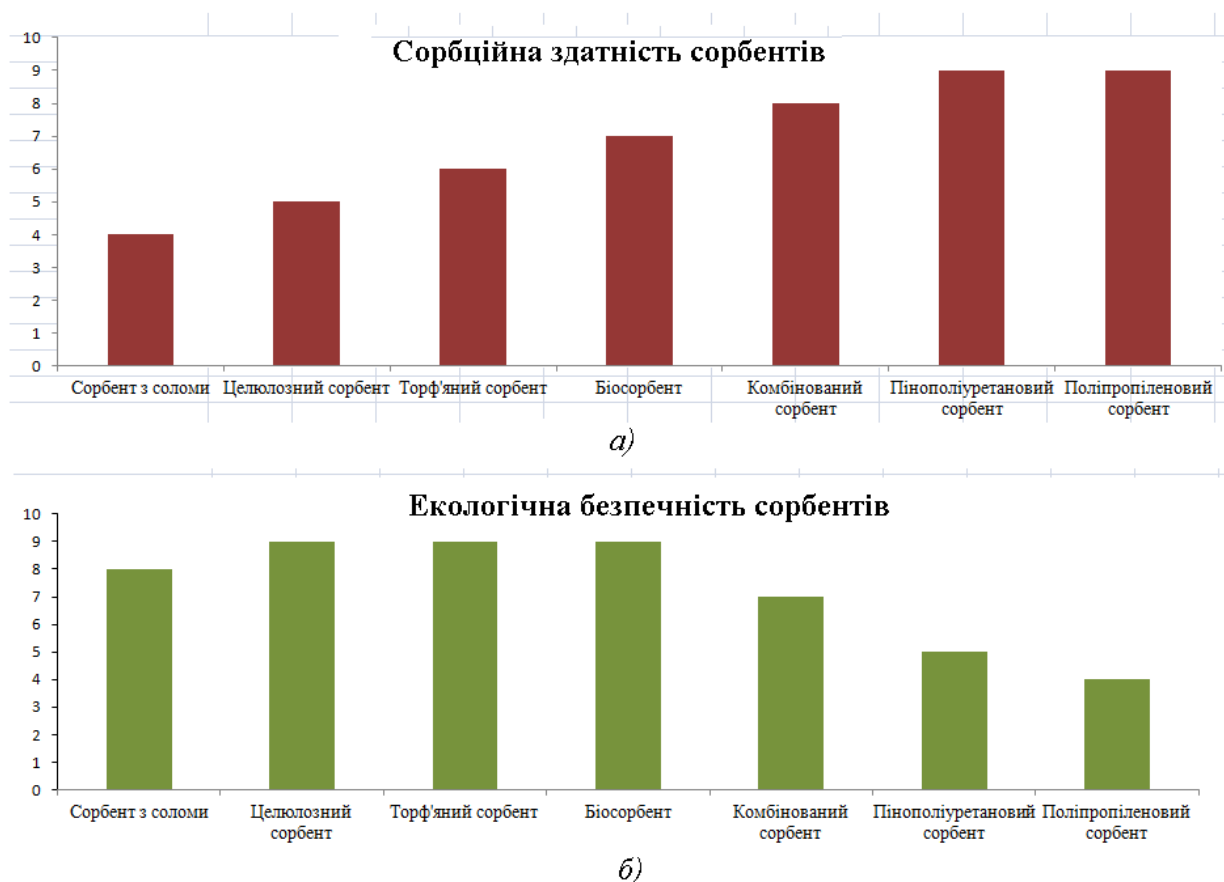


Рис. 1.10. Ефективність різних типів нафтових сорбентів у двох ключових вимірах (у балах від 0-10): *а* – сорбційна здатність; *б* – екологічна безпечність.

Зручність використання сорбенту залежить від його форми: порошок, гранули, волокна, тканина, мати, стрічки, серветки, бони тощо. Нафтосорбенти у вигляді масивних виробів (зазвичай це синтетичні полімерні матеріали) мають високу ємність, але збирати їх доводиться вручну і їх складніше утилізувати. Труднощі застосування дисперсних сорбентів пов'язані з необхідністю наявності спеціального обладнання як нанесення їх на поверхню, так наступного збору. Навіть помірний вітер перешкоджає їх використанню. Також сорбенти мають бути нетоксичні та безпечні для планктону та інших видів водної біоти.

Ефективність сорбентів, що застосовуються для ліквідації розливів нафти та нафтопродуктів, суттєво залежить від низки факторів навколишнього

середовища. Серед них вирішальне значення мають температура, вологість, характер поверхні, швидкість вітру, солоність води та наявність хвиль. Особливо важливим є вплив температури, яка безпосередньо впливає як на властивості нафти, так і на механізм поглинання сорбентом.

Температура як критичний фактор. Температура середовища значно впливає на в'язкість та текучість нафти. При підвищенні температури нафта стає менш в'язкою, краще розтікається по поверхні та проникає глибше у пористу структуру сорбенту, що сприяє підвищенню ефективності поглинання. Натомість при низьких температурах, особливо нижче 0°C , нафта загусає, частково кристалізується або емульгується, що ускладнює її сорбцію. У таких умовах сорбент поглинає менше забруднювача, а швидкість процесу суттєво знижується.

Наприклад, поліпропіленові сорбенти виявляють високу поглинальну здатність при температурі вище $+10^{\circ}\text{C}$, однак при зниженні температури до -5°C ефективність може знижуватися на 20–40%. Сорбенти на основі органічної сировини (соломи, торфу, целюлози) також демонструють зниження активності при охолодженні через зменшення капілярної дії і сповільнення фізико-хімічних процесів.

Солоність води. У морській воді сорбенти можуть поводитись інакше, ніж у прісній: через наявність солей змінюється поверхневий натяг і проникність нафтового шару, що впливає на взаємодію із сорбентом.

Хвильова активність та вітер можуть як полегшити, так і ускладнити процес сорбції. З одного боку, рух води сприяє рівномірному розподілу нафти, з іншого – може змивати сорбент або знижувати ефективність при слабкому закріпленні.

Вологість повітря та дощ впливають на сорбенти, особливо біологічного походження, змінюючи їхню вагу та структуру.

Тип поверхні (вода, ґрунт, бетон) також визначає, наскільки ефективно сорбент утримує нафту та чи можливо її вторинне збирання або регенерація.

Отже, для досягнення максимальної ефективності при застосуванні нафтових сорбентів необхідно враховувати кліматичні й погодні умови, особливо температуру навколишнього середовища. Залежно від температурного режиму варто обирати відповідні типи сорбентів: синтетичні – для холодного клімату, біосорбенти – для теплих і помірних умов. Подальші дослідження мають бути спрямовані на розробку адаптивних та універсальних сорбційних матеріалів, здатних ефективно працювати в широкому діапазоні природних умов.

З екологічної точки зору, зростає інтерес до використання біосорбентів та регенерованих матеріалів, які забезпечують менше навантаження на довкілля протягом життєвого циклу. Оцінка ефективності сорбентів має проводитися не лише за технічними параметрами, а й з урахуванням їхнього екологічного сліду.

РОЗДІЛ 2

ТЕХНОЛОГІЯ ЛОКАЛІЗАЦІЇ АВАРІЙНОГО РОЗЛИВУ НАФТИ І НАФТОПРОДУКТІВ НА ВОДНОМУ ОБ'ЄКТІ ІЗ ЗАСТОСУВАННЯМ СОРБЕНТІВ

2.1 Технологія локалізації і ліквідації аварійного розливу нафтопродуктів на водному об'єкті із застосуванням сорбентів

Аварійні розливи нафтопродуктів на водних об'єктах становлять одну з найсерйозніших екологічних загроз для довкілля. Їхні наслідки включають забруднення води, загибель водної флори та фауни, деградацію прибережних екосистем і складність у відновленні природного балансу. Одним з ефективних підходів до ліквідації таких аварій є застосування сорбентів – матеріалів, що здатні поглинати або адсорбувати нафту та її похідні з водної поверхні.

Технологія локалізації та ліквідації розливу нафтопродуктів із застосуванням сорбентів включає кілька послідовних етапів, які охарактеризовані нижче.

1. Виявлення та оцінка масштабу розливу

Цей етап передбачає оперативне спостереження, картографування площі розливу, визначення типу нафтопродукту (дизель, мазут, бензин тощо), його об'єму та фізико-хімічних властивостей. Оцінка враховує погодні умови, температуру, швидкість вітру, хвилювання води.

2. Локалізація забруднення

Для запобігання поширенню нафтопродукту по акваторії використовуються бонові загородження. Вони утворюють периметр навколо плями, обмежуючи її рух. У разі течії чи хвильових явищ використовуються спеціальні типи бонів – хвилестійкі, з якорінням.

3. Нанесення сорбентного матеріалу

Після локалізації нафтопродуктів на поверхню води рівномірно наноситься сорбент. Залежно від типу забруднення, кліматичних умов і доступних ресурсів застосовуються:

- гранульовані сорбенти (торф, цеоліт, активовані мінерали);
- матеріали у вигляді рулонів, подушок, бонів – переважно поліпропіленові або комбіновані;
- органічні сорбенти на основі соломи, лушпиння, тирси з модифікацією для гідрофобності.

Сорбенти можуть бути застосовані вручну або з використанням спеціалізованої техніки (сорбційних гармат, барж або дронів-розпилювачів).

4. Контакт і сорбція

Упродовж певного часу (залежно від типу сорбенту і товщини шару нафти) відбувається поглинання нафтопродуктів. Оптимальний час контакту визначається експериментально або за методичними рекомендаціями. У разі великих забруднень можуть застосовуватись кілька шарів сорбенту.

5. Збирання насиченого сорбенту

Після завершення сорбції проводиться збирання відпрацьованого сорбенту з поверхні води. Це може здійснюватися вручну (сітками, щипцями) або з використанням механізованих систем – збиранням бонів, спеціальними зневоднюючими установками. Важливо не допустити розпаду сорбенту у воді.

6. Утилізація або регенерація сорбенту

Зібрані сорбенти підлягають утилізації згідно з екологічними нормативами. Деякі синтетичні сорбенти (наприклад, поліпропіленові) можна регенерувати методом віджимання, термічної обробки або центрифугування з подальшим повторним використанням. Органічні сорбенти зазвичай утилізуються шляхом спалювання в інсинераторах або компостування (за умов низького рівня токсичності) (рис. 2.1).

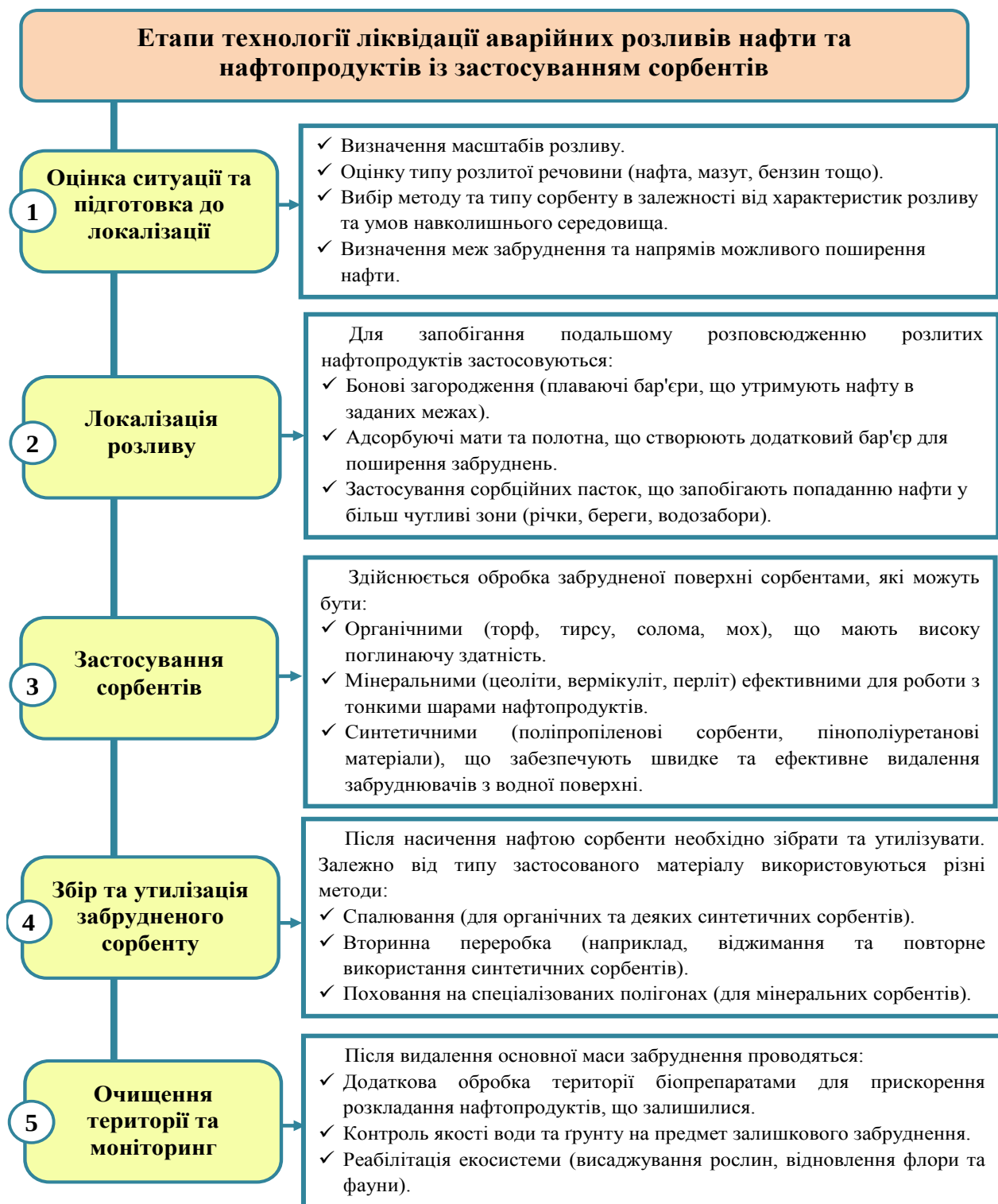


Рис. 2.1. Етапи технології локалізації і ліквідації аварійного розливу нафти з використанням сорбентів

Використання сорбентів різних видів та форм може відбуватися у певній послідовності або за певними варіантами, які наведені у табл. 2.1.

Таблиця 2.1. Послідовність (варіанти) використання різних видів та форм сорбентів нафти на водному об'єкті

№	Послідовність (варіанти)	Опис
1	Початкове нанесення сорбентів на нафтову пляму	Цю операцію бажано провести перед підходом основних сил. Доцільно використати авіатранспорт. За невеликих розливів нафтопродуктів ця операція основна, а іноді й єдина.
2	Нанесення сорбенту вздовж берегової лінії	Ця операція дозволяє мінімізувати шкоду, що завдається нафтою береговій смугі, і значно знизити обсяг робіт зі збирання нафти з ґрунту. Сорбент не дозволяє підійти рідкій нафті впритул до берега, створюючи своєрідну перешкоду.
3	Установка першого ряду загороджувальних бонів	Ця операція спрямована на запобігання подальшому розповсюдженню нафти. Установка бонів проводиться у місцях зниження швидкості течії водоймища для забезпечення нормальної роботи бонів, а згодом і нафто збірної техніки (повороти річки, місця розширення русла та ін.). Слід враховувати, що найбільша ефективність бонових загороджень досягається при куті установки бонів 15-20° до течії річки або іншого водного об'єкта.
4	Нанесення сорбенту безпосередньо перед бонами	Цю операцію слід проводити за великої кількості розливої нафти (нафтопродукту) — створюється додаткова перешкода її руху, відбувається насичення сорбенту. Ця операція доцільна і за високої швидкості течії річки. Сорбована нафта має підвищену плавучість, що поряд з бар'єром із сорбенту перешкоджає протіканню нафти під боновими загородженнями.
5	Установка другого ряду бонових загороджень та нанесення сорбенту між рядами бонів	Мета операції – додатковий захист водного об'єкта вниз за течією від нафти, що прослизає, і до очищення води від нафтопродуктів. Відстань між рядами бонових огорож має бути не менше 7-10 м. У деяких випадках одного-двох рядів бонів може бути недостатньо, тоді встановлюється така кількість рядів бонових загороджень, яка дозволяє досягти повної локалізації нафтозабруднення. Передбачається використання і сорбуючих бонів (рис. 2.2 та рис. 2.3).

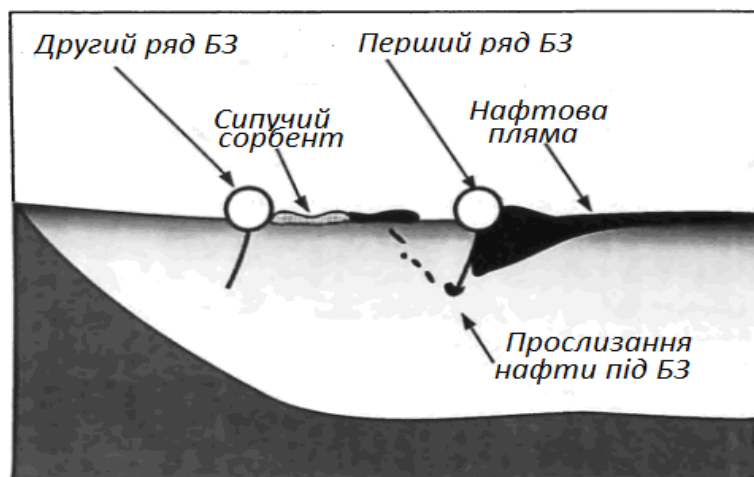


Рис. 2.2. Нанесення сорбентів між рядами бонових загороджень (БЗ)

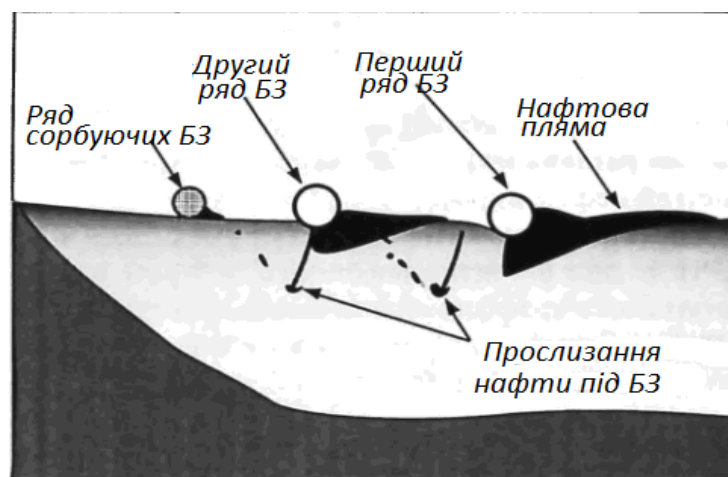


Рис. 2.3. Використання сорбуючих бонів після рядів утримуючих бонових загороджень (БЗ)

Основне завдання при використанні сорбентів у разі розливу нафти (нафтопродуктів) на водоймищах – максимальне зниження втрат нафти при виставленні бонів біля нафтової плями і його тралення, а також запобігання потраплянню чистої нафти (нафтопродуктів) на берег за допомогою сорбентних перешкод (рис. 2.4). Така тактика пояснюється складністю та високою трудомісткістю збирання чистої нафти (нафтопродуктів) з берегової смуги. Наявність прибережної рослинності значно ускладнює процес очищення берега та збирання нафти.

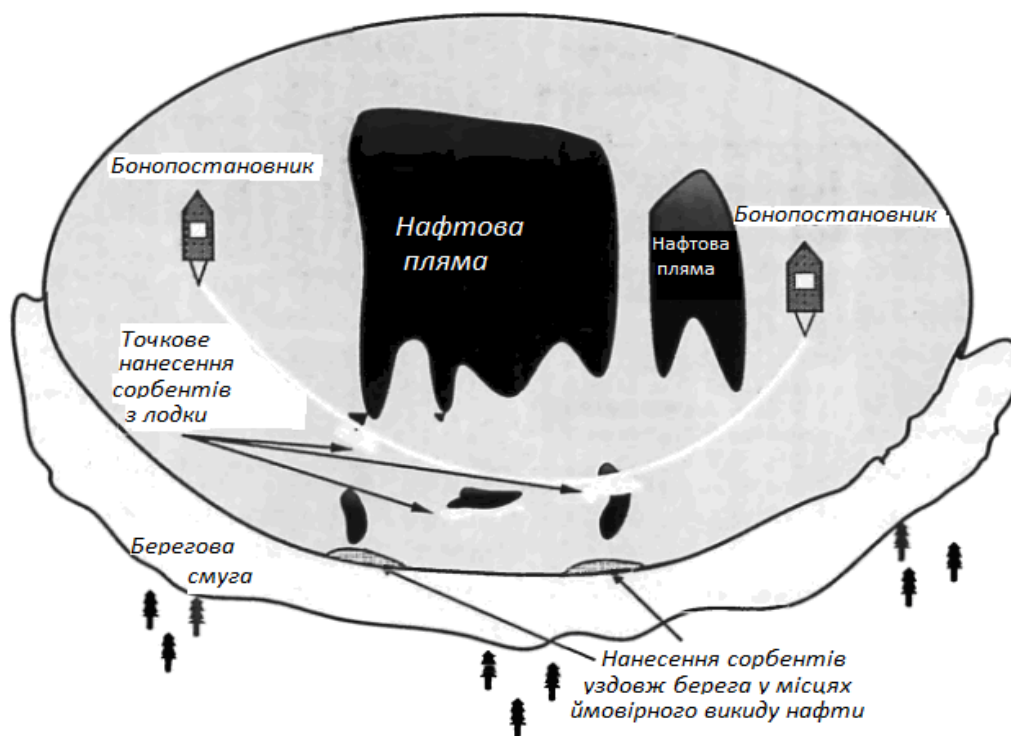


Рис. 2.4. Схема реагування на аварійні розливи нафти (нафтопродуктів) із застосуванням сипучих сорбентів на водоймах за ймовірності забруднення берегової смуги

Перевагами технології локалізації аварійного розливу нафтопродуктів на водному об'єкті із застосуванням сорбентів є:

- простота застосування;
- можливість роботи в важкодоступних районах;
- мінімальне енергоспоживання;
- висока локалізація забруднень.

Недоліками даної технології є :

- обмежена ефективність при великій товщині шару нафти;
- вплив погодних умов (вітер, дощ, температура);
- потреба у подальшій утилізації або регенерації;
- часткова залежність від людського фактору.

При прийнятті рішення щодо застосування сорбційної технології для ліквідації розливів нафтопродуктів необхідно враховувати низку технічних,

екологічних, економічних та організаційних факторів, які визначають доцільність, ефективність і безпечність використання сорбентів у конкретних умовах. Нижче наведено ключові аспекти, які слід враховувати.

Характеристика забруднення:

- тип нафтопродукту – легкі (бензин, дизель) або важкі (мазут, мастила). Легкі фракції швидко випаровуються і можуть не потребувати сорбції;
- обсяг розливу. При малих обсягах сорбенти ефективні, але при масштабних розливах можуть бути малопродуктивними або занадто дорогими;
- щільність та в'язкість розлитої речовини, які визначають швидкість і глибину поглинання;
- форма забруднення (тонка плівка, емульсія, товстий шар). Різні форми вимагають різних підходів.

Умови навколишнього середовища:

- температура повітря та води впливає на в'язкість нафти і сорбційну здатність матеріалу;
- хвильовий режим і швидкість течії можуть ускладнювати утримання сорбентів на місці;
- солоність води – деякі сорбенти змінюють властивості у морській воді;
- дощ або сніг можуть знижувати ефективність сорбентів, особливо органічних сорбентів;
- вітер і погодні умови впливають на поширення розливу і стійкість сорбенту.

Доступність ресурсів і технічних засобів:

- наявність відповідних сорбентів: синтетичних, органічних, гранульованих чи у вигляді бонів;
- засоби доставки сорбентів до місця аварії: баржі, катери, дрони тощо;
- можливості збору насиченого сорбенту (чи є техніка, чи потрібне ручне збирання);
- умови транспортування та зберігання відпрацьованого сорбенту.

Екологічна доцільність:

- селективність сорбенту (чи не поглинає воду разом з нафтою);
- ризик вторинного забруднення в результаті розпаду або рознесення сорбенту;
- біорозкладність матеріалу, що особливо важливо для чутливих екосистем.
- можливість регенерації, що зменшує кількість відходів.

Економічна ефективність:

- вартість сорбенту та логістики;
- витрати на збір і утилізацію насиченого матеріалу;
- порівняння з альтернативними методами (механічне збирання, хімічна диспергація, спалювання);
- рентабельність у конкретному масштабі інциденту.

Оперативність реагування;

- швидкість доставки сорбентів на місце події;
- час, необхідний для розгортання технології;
- кваліфікація персоналу для роботи з сорбційною технікою.

Існує кілька способів нанесення сорбентів.

1. Ручний розподіл. Цей метод застосовується за локальних розливів, коли забруднена площа відносно невелика. Сорбенти (наприклад, гранули, порошки, мати) рівномірно розсипаються вручну з човнів або з берега, після чого проводиться їх збирання.

2. За допомогою спеціалізованих установок. Для прискорення процесу застосовуються механізовані установки, що рівномірно розподіляють сорбенти по поверхні води. Такі установки монтуються на судна та можуть працювати в автоматичному режимі, збільшуючи ефективність ліквідаційних заходів.

3. Авіадесантування. При великих розливах ефективним способом нанесення сорбентів є використання авіації (вертольоти чи літаки). Сорбенти скидаються з повітря, що дає змогу швидко покрити великі забруднені площі. Цей метод особливо корисний у важкодоступних районах.

4. Застосування дронів. Сучасні технології дозволяють використовувати дрони для точкового та рівномірного нанесення сорбентів на поверхню води. Цей метод ефективний для роботи в складних умовах, наприклад поблизу берегової лінії або в льодових зонах.

5. Використання сорбційних бонів. Сорбційні бони є бар'єрні конструкції, просочені сорбентами, які розміщуються на поверхні води. Вони не тільки вбирають нафту, але і перешкоджають її подальшому поширенню.

6. Комбіновані методи. Часто застосовуються кілька методів одночасно, наприклад, поєднання авіаційного розпилення з подальшим механічним очищенням або використання дронів для дозованого внесення сорбентів в критично забруднені зони.

Вибір методу нанесення сорбентів залежить від масштабів забруднення, погодних умов, типу водойми та доступності технічних засобів. Ефективне використання сорбентів дозволяє мінімізувати екологічні збитки та прискорити відновлення водних екосистем.

Однак у деяких випадках застосування сорбентів локалізаторів економічно не вигідно. Наприклад, нанесення сорбентів малоефективно у разі, коли нафтова пляма йде суцільною смугою, товщина його більше 5 мм, а швидкість течії на ділянці річки менше 0,2 м/с (вигідніше використовувати механічні бар'єри і загородження), а також у випадку, коли нафта розливається на невеликій відстані від місць зосередження сил та засобів ліквідації аварії та є можливість ефективного використання більш дешевих засобів локалізації.

Таким чином застосування сорбентів є ефективним і доступним методом локалізації та ліквідації аварійних розливів нафтопродуктів на водних об'єктах. Вибір конкретного типу сорбенту та технологічної схеми повинен базуватись на характеристиках забруднення, природно-кліматичних умовах, можливостях оперативного реагування та екологічних наслідках.

2.2 Розрахунок необхідної кількості сорбенту для ліквідації розливу нафтопродукту

Ліквідація розливів нафтопродуктів – це складний процес, що потребує оперативного та точного підходу. Одним із ключових факторів успіху є правильний розрахунок необхідної кількості сорбенту. Нестача сорбенту може призвести до неповного збору розливу, а надлишок – до невиправданих витрат.

Основні дані до виконання розрахунку наведено у табл. 2.2.

Таблиця 2.2. Вихідні дані для розрахунку

№	Показник	Значення (роз'яснення)
1	Вид небезпеки	Небезпека розливу нафти та нафтопродуктів
2	Небезпечні речовини	Бензин А-95
3	Густина нафтопродуктів, кг/м ³	750
4	Об'єм розлитих нафтопродуктів, м ³	420
5	Відстань до найближчого берега, м	700
6	Ухвалений час збору нафтопродукту, з урахуванням наявної техніки	5 год
7	Вид сорбенту	Поліпропіленове волокно
8	Сорбційна здатність сорбенту	25 кг/кг
9	Кількість циклів регенерації сорбенту	3-5

Розрахунок необхідної кількості сил та засобів, для збирання розлитого нафтопродукту.

Розрахунок обсягу нафтопродукту, що збирається, проводиться за формулою:

$$V = 0,7 \cdot V_p, \quad (2.1)$$

де V_p – об'єм розливої нафтопродукту, м³.

$$V = 0,7 \cdot 420 = 294 \text{ м}^3$$

Розрахунок кількості насосного обладнання проводиться за формулою:

$$N_{\text{нас}} = V/\Pi, \quad (2.2)$$

де Π – продуктивність насосного обладнання, $50 \text{ м}^3/\text{год}$;

T – час збирання нафтопродукту, з урахуванням наявної техніки, часу оповіщення, доставки зусиль і засобів, – приймаємо 5 годин.

$$N_{\text{нас}} = V/\Pi = 294/50 = 6 \text{ од.}$$

Розрахунок кількості особового складу проводиться за формулою:

$$N_{\text{о/с збір}} = 2 \cdot N_{\text{нас}}, \quad (2.3)$$

де коефіцієнт 2 – кількість особового складу на 1 одиницю насосного обладнання.

$$N_{\text{о/с збір}} = 2 \cdot 6 = 12 \text{ осіб.}$$

Розрахунок необхідної кількості сорбентів.

Необхідна кількість сорбентів $M_{\text{сорб}}$, кг, розраховується за формулою:

$$M_{\text{сорб}} = \frac{N_{\text{забр}} \cdot N_{\text{сорб}} \cdot M}{C_{\text{сорб}}}, \quad (2.4)$$

де $N_{\text{забр}}$ – частка нафтопродукту, що забруднює водну поверхню (при нафторозливі частка нафтопродукту, що залишилася на воді, становить до 95% від обсягу розливу, решта нафтопродукту випаровується);

$N_{\text{сорб}}$ – частка нафтопродукту, що збирається сорбентом (нафтозбірними пристроями з поверхні води може бути зібрано 70% від нафтопродукту, що залишився на поверхні ґрунту, тобто близько 30% нафтопродукту залишається в плівці на воді і повинна збиратися з використанням сорбенту);

M – маса розлитого нафтопродукту, кг;

$C_{\text{сорб}}$ – сорбційна здатність сорбенту, кг/кг.

Масу розлитого нафтопродукту (бензину А-95) визначаємо за формулою:

$$M = V \cdot \rho, \text{ кг} \quad (2.5)$$

де V_p – об'єм розливої нафтопродукту, м^3 ;

ρ – густина нафтопродукту, $\text{кг}/\text{м}^3$;

$$M = 420 \cdot 750 = 315000 \text{ кг.}$$

Згідно з ТУ сорбент з поліпропілену може використовуватися від 3 до 5 циклів.

Сорбційна здатність сорбентів із циклами регенерації більше трьох розраховується за формулою:

$$C_{\text{сорб}} = (C_n + (C_n \cdot k_1) + (C_n \cdot k_2) + (C_n \cdot k_2 \cdot (N - 3))) \cdot k_c, \quad (2.6)$$

де C_n – паспортна сорбційна здатність сорбенту, кг/кг;

k_1 – коефіцієнт першого циклу регенерації сорбенту ($k_1 = 0,75$);

k_2 – коефіцієнт другого циклу регенерації сорбенту ($k_2 = 0,5$);

N – кількість циклів регенерації сорбенту;

k_c – коефіцієнт вилучення сорбентів ($k_c = 0,75$).

При середній паспортній сорбційній здатності сорбенту $C_n = 25$ кг/кг, сорбційна здатність

$$C_{\text{сорб}} = (25 + (25 \cdot 0,75) + (25 \cdot 0,5) + (25 \cdot 0,5 \cdot (5 - 3))) \cdot 0,75 = 60,94 \text{ кг/кг.}$$

При максимально можливому розливі нафтопродукту маса сорбенту на основі поліпропіленового волокна складатиме:

$$M_{\text{сорб п}} = (0,95 \cdot 0,3 \cdot 315000) / 60,94 = 1473,2 \text{ кг} = 1,47 \text{ тонн.}$$

При збиранні нафтопродукту відкачування зібраного нафтопродукту здійснюється у вільний резервуар ємністю, що відповідає розливу нафтопродукту.

Для порівняння визначимо необхідну кількість сорбуючого матеріалу при використанні сорбенту на основі модифікованого торфу і целюлозного сорбенту, виробленого з деревної тирси, які використовуються один раз без регенерації.

Сорбційна здатність зазначених сорбентів наступна:

- торф'яний сорбент – $C_t = 10$ кг/кг;
- целюлозний сорбент – $C_{\text{ц}} = 6$ кг/кг.

Необхідна маса сорбенту буде дорівнювати (рис. 2.5):

- торф'яний сорбент: $M_{\text{сорб т}} = (0,95 \cdot 0,3 \cdot 315000) / 10 = 8977,5 \text{ кг} = 8,98 \text{ тонн.}$
- целюлозний сорбент: $M_{\text{сорб ц}} = (0,95 \cdot 0,3 \cdot 315000) / 6 = 14963 \text{ кг} = 14,96 \text{ тонн.}$

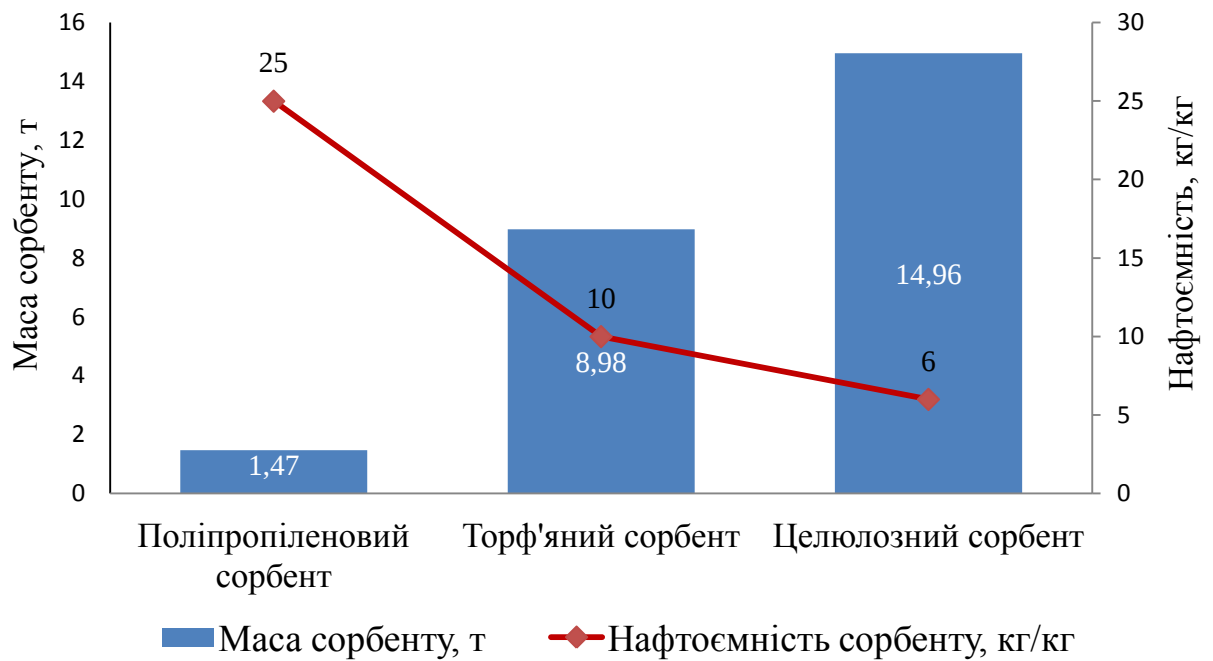


Рис. 2.5. Порівняння необхідної кількості різних типів сорбентів при ліквідації розливу нафтопродукту (бензину А-95) об'ємом 420 м³.

З урахуванням проведених розрахунків треба зазначити, що застосування поліпропіленових сорбентів дозволяє використати меншу кількість сорбентів для ефективної ліквідації аварійного розливу нафти. До того ж поліпропіленовий сорбент має декілька циклів регенерації. Хоча з екологічної точки зору більш доцільними є торф'яний та целюлозний сорбенти.

Таким чином використання сорбентів дозволяє створити єдину систему екологічного обслуговування об'єктів не тільки у випадках ліквідації аварійних розливів, але й ефективно використовувати як систему запобігання попаданню нафтопродуктів у вигляді розливів, проток та протікань у навколишнє середовище від стаціонарних локальних джерел забруднень на будь-яких підприємствах. Попередити потрапляння нафтопродуктів у природне середовище можуть сорбційні вироби – мати на основі нетканого сорбенту, який має комплекс спеціальних властивостей. Такі бони мають високі сорбуючі показники, достатню утримуючу здатність, міцність, необмежену плавучість на поверхні води, пружність, а також відновлюються при механічних навантаженнях.

РОЗДІЛ 3

АНАЛІЗ ЖИТТЄВОГО ЦИКЛУ НАФТОВИХ СОРБЕНТІВ

3.1 Методологія оцінки життєвого циклу: основні принципи, етапи та міжнародні стандарти

В сучасних умовах розвитку технологій та підвищення уваги до екологічної відповідальності, все більшої ваги набуває підхід оцінки життєвого циклу продукції або технології (Life Cycle Assessment, LCA). Цей підхід є ключовим інструментом у впровадженні принципів сталого розвитку, екоінновацій та «зеленої» економіки, оскільки дозволяє системно оцінити вплив продукту або процесу на довкілля протягом усього життєвого циклу — від видобутку сировини до остаточної утилізації.

Оцінка життєвого циклу (LCA) – це методологія, яка забезпечує кількісну оцінку впливу продукту або процесу на навколишнє середовище. Вона враховує всі стадії життєвого циклу: видобуток сировини, виробництво, транспортування, використання, регенерацію або утилізацію.

Оцінка життєвого циклу (LCA) – це потужний цілісний інструмент для оцінки впливу нових технологій на навколишнє середовище.

Основними принципами оцінки життєвого циклу є:

- циклічність та повнота – оцінюються всі стадії «від колиски до могили» або «від колиски до колиски» (у випадку повторного використання чи замкненого циклу);
- масо-енергетичний баланс – розраховується потік матеріалів, енергії, викидів та відходів;
- порівняльність – метод дозволяє обґрунтовано порівнювати альтернативні варіанти матеріалів, технологій або продуктів;
- прозорість і відтворюваність – результати мають бути обґрунтованими, документованими і придатними для зовнішньої верифікації.

Методологія оцінки життєвого циклу регламентується міжнародними стандартами серії ISO 14040 та ISO 14044, які визначають чотири ключові етапи оцінки:

1. **Визначення мети та області застосування (*Goal and Scope Definition*)**. На цьому етапі формулюється мета дослідження, обирається функціональна одиниця (наприклад, 1 кг сорбенту, або 1 м² очищеної поверхні), визначається система дослідження (сировинні межі, географія, часовий горизонт). Важливо також чітко визначити, які впливи будуть враховуватись (викиди CO₂, токсичність, споживання енергії тощо).

2. **Інвентаризація життєвого циклу (*Life Cycle Inventory, LCI*)**. Цей етап передбачає збір даних про всі матеріальні та енергетичні потоки, пов'язані з кожною стадією життєвого циклу. Наприклад, для нафтового сорбенту: енерговитрати на видобуток сировини, кількість використаної води, викиди при транспортуванні, кількість залишкової нафти після використання тощо.

3. **Оцінка впливів життєвого циклу (*Life Cycle Impact Assessment, LCIA*)**. На цьому етапі інвентарні дані трансформуються в категорії впливу, такі як: глобальне потепління (GWP), евтрофікація, кислотні дощі, виснаження ресурсів. Використовуються моделі впливу та вагові коефіцієнти, наприклад ReCiPe, CML, TRACI.

4. **Інтерпретація результатів (*Interpretation*)**. Отримані результати аналізуються, формується висновок щодо екологічної ефективності об'єкта дослідження. При необхідності, проводиться аналіз чутливості, валідація даних та надаються рекомендації щодо оптимізації. У випадку порівняльної оцінки життєвого циклу, обґрунтовується перевага одного варіанту над іншим (рис. 3.1).



Рис. 3.1. Етапи оцінки життєвого циклу продукту

Основними нормативними документами, які регламентують проведення оцінки життєвого циклу, є:

- ISO 14040:2006 – Загальні принципи та структура оцінки життєвого циклу;
- ISO 14044:2006 – Вимоги та керівництво щодо проведення оцінки життєвого циклу продукту;
- ISO 14067:2018 – Вуглецевий слід продукту;
- PAS 2050 – Методика, що допомагає визначити вплив продукції на навколишнє середовище, вимірюючи викиди парникових газів на всіх етапах життєвого циклу.

Застосування методології оцінки життєвого циклу до нафтових сорбентів дозволяє:

- об'єктивно порівняти різні типи сорбентів (природні, синтетичні, комбіновані тощо);

- оцінити «приховані» екологічні витрати, пов'язані з виробництвом та утилізацією;
- виявити критичні стадії життєвого циклу, що потребують екологічної оптимізації;
- обґрунтувати вибір сорбенту не лише за технічними, а й за екологічними критеріями.

Методологія оцінки життєвого циклу є сучасним, науково обґрунтованим і стандартизованим підходом до комплексної оцінки екологічних характеристик продукції. В контексті даного дослідження, вона дозволяє не лише оцінити поточний вплив нафтових сорбентів на довкілля, а й сформулювати рекомендації щодо вдосконалення їх життєвого циклу – від вибору сировини до завершення утилізації. Таким чином, оцінка життєвого циклу сприяє ухваленню рішень, орієнтованих на сталий розвиток та мінімізацію екологічних ризиків у сфері поводження з нафтовими забрудненнями.

3.2 Узагальнена модель життєвого циклу сорбенту нафти

Комплексна оцінка життєвого циклу сорбенту нафти є ключовим інструментом для розуміння повного спектра екологічних наслідків, пов'язаних із його виробництвом, використанням і утилізацією. Узагальнена схема дозволяє наочно представити всі стадії життєвого циклу, виявити критичні точки впливу на довкілля ("гарячі точки") та сформулювати підґрунтя для прийняття рішень щодо вибору типу сорбенту з урахуванням принципів екологічної безпеки та сталого розвитку.

Такий системний підхід включає аналіз матеріальних і енергетичних потоків, а також кількісне оцінювання екологічних впливів на всіх етапах: від видобутку сировини до кінцевої утилізації або повторного використання сорбенту. Узагальнена схема дозволяє інтегрувати дані інвентаризації, ефективності сорбції та впливу на довкілля, забезпечуючи цілісне бачення екологічного профілю продукту.

На рис. 3.2 наведено графічну інтерпретацію загальної LCA-моделі для нафтового сорбенту, що базується на даних попередніх етапів дослідження. Вона служить основою для подальшого порівняння альтернативних технологій та оптимізації життєвого циклу продукту.

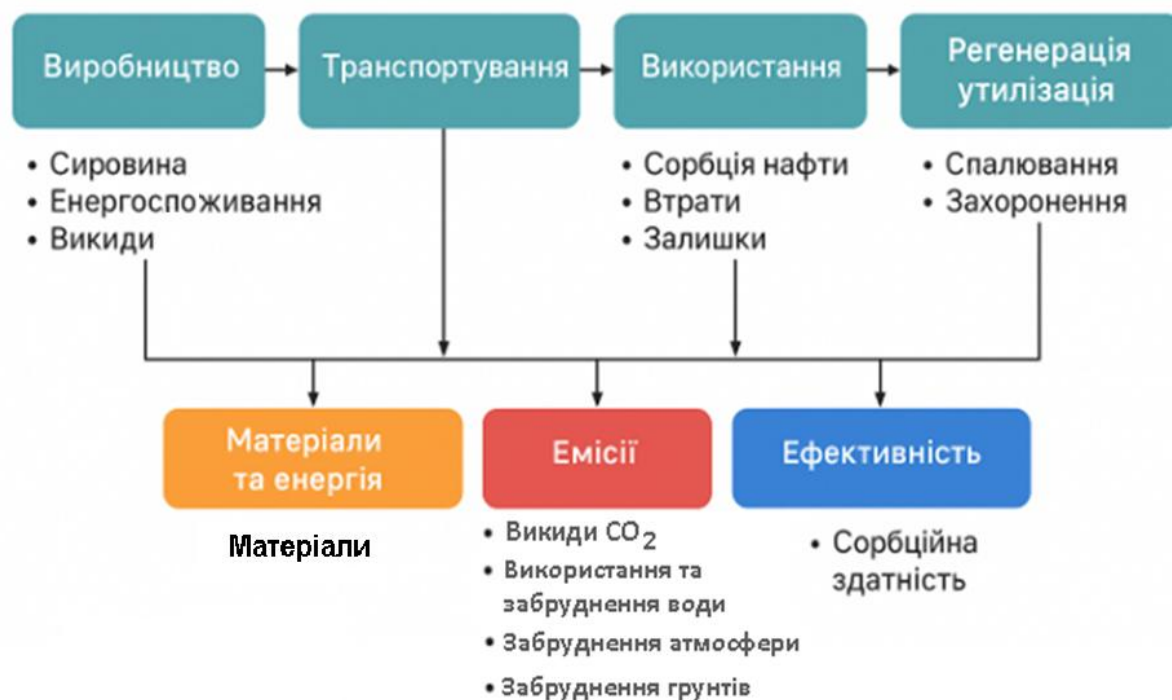


Рис. 3.2. Узагальнена модель життєвого циклу нафтового сорбенту

Блок-схема наведена на рис. 3.2 моделює повний життєвий цикл нафтового сорбенту, включаючи чотири основні етапи: виробництво, транспортування, використання, утилізація/регенерація. Це дозволяє простежити і кількісно оцінити усі значущі матеріальні, енергетичні потоки та впливи на довкілля, що виникають протягом повного життєвого циклу (табл. 3.1).

Модель оцінки життєвого циклу є дієвим інструментом для обґрунтування вибору типу сорбенту з урахуванням не лише його ефективності, а й загального екологічного навантаження протягом життєвого циклу. Оптимізація моделі життєвого циклу передбачає зменшення енерговитрат на виробництво, вибір екологічніших матеріалів та сценаріїв поводження після використання (наприклад, регенерація замість спалювання).

Таблиця 3.1. Етапи життєвого циклу сорбенту нафти: процеси та основні впливи

№	Етап	Процеси	Основні екологічні впливи
1	Стадія виробництва	Видобуток сировини. Обробка і виробництво.	Високі витрати енергії, використання води, викиди CO ₂ та інших забруднювачів, утворення відходів під час формування сорбенту.
2	Логістика (транспортування)	Перевезення сировини та готової продукції до місць зберігання або використання.	Споживання палива, викиди CO ₂ , NO _x
3	Етап використання	Сорбція нафти/нафтопродуктів у водному середовищі. Ключові параметри: ефективність сорбції, селективність до нафти, стійкість до умов середовища.	Мінімальні екологічні впливи, однак можлива зміна властивостей сорбенту
4	Утилізація або регенерація	Сценарії: спалювання, повторне використання, захоронення або біодеградація.	Формування залишкових відходів, додаткові викиди або зниження впливів за рахунок повторного використання.

3.3 Стадія виробництва

Стадія виробництва є однією з ключових фаз у життєвому циклі нафтових сорбентів, оскільки саме на цьому етапі формується значна частина екологічного навантаження. Виробництво охоплює кілька взаємопов'язаних процесів: видобуток сировини, її транспортування, первинну обробку, виробничу переробку, формування готового продукту, а також супутні логістичні й енергетичні витрати.

Видобуток та підготовка сировини. Залежно від типу сорбенту, джерела сировини суттєво відрізняються.

Природні сорбенти (торф, цеоліт, мінеральні породи, органічна біомаса):

- потребують видобутку з ґрунтових шарів або родовищ;
- часто пов'язані з механічним впливом на ландшафт, порушенням ґрунтів, знищенням природних екосистем;
- підготовка включає сушіння, подрібнення, очищення від домішок.

Синтетичні сорбенти (поліпропілен, поліуретан, пінопласт):

- виготовляються з нафтопродуктів та полімерів, для яких потрібні складні хімічні виробничі процеси;
- значна частина вуглецевого сліду формується вже на етапі синтезу мономерів, їх полімеризації та екструзії;
- супроводжується високим споживанням енергії, а також викидами CO₂, NO_x, летких органічних сполук (ЛОС).

Комбіновані (композитні) сорбенти:

- потребують паралельного постачання та обробки кількох типів сировини;
- часто включають біосировину (целюлоза, мікрододорості, лігнін) + полімерну матрицю;
- їхня перевага полягає в можливості частково замінити викопне походження матеріалів відновлюваними ресурсами.

Енергоспоживання. Процес виробництва сорбентів включає цілий ряд енергоємних операцій: нагрівання, екструзія, пінування, сушіння, пресування, гранулювання тощо. Залежно від типу виробу, рівень споживання електроенергії та палива може значно варіюватися:

- для поліпропіленових рулонних сорбентів характерні високі витрати на розплавлення полімеру, витягування волокон і термоформування;
- біосорбенти, навпаки, можуть вироблятися за допомогою відновлюваної енергії (наприклад, при сушінні за допомогою сонячних

колекторів), однак у деяких випадках потребують попереднього хімічного оброблення;

- комбіновані матеріали можуть мати оптимізовані параметри, однак процес зшивання матеріалів (хімічного або термічного) часто енерговитратний.

Згідно даних Європейської платформи з оцінки життєвого циклу (European Platform on LCA) [44] та швейцарської асоціації Ecoinvent Association, що має провідну LCA-базу даних із детальними енергетичними характеристиками матеріалів [42], енергетичний слід становить:

- для поліпропіленового сорбенту – 30-40 МДж/кг;
- для целюлозного – 15-20 МДж/кг;
- для композиту (біо+полімер) – 25-35 МДж/кг.

Викиди в атмосферу та інші середовища. Викиди на етапі виробництва мають різну природу і можуть впливати на локальне та глобальне середовище.

Парникові гази (CO_2 , CH_4 , N_2O) утворюються при спалюванні палива, нагріванні, транспортуванні сировини. Найбільші шкідливі викиди в атмосферне повітря виникають при синтезі полімерів та переробці нафтових продуктів.

Токсичні речовини виникають при полімерному виробництві, яке супроводжується виділенням летких органічних сполук (ЛОС), формальдегіду, фенолу, азотистих оксидів. Зазначені токсичні сполуки можуть мати негативний вплив на здоров'я працівників та довкілля (за відсутності фільтрації чи рекуперації).

Крім цього відбувається утворення значної кількості відходів та виробничих стічних вод. При механічному подрібненні, формуванні або очищенні сировини можуть утворюватися залишки сировини, вторинна пульпа, шлам. Все це потребує утилізації або залучення в замкнені цикли (наприклад, переробка торф'яної пили або полімерної стружки).

Стадія виробництва нафтових сорбентів має суттєвий вплив на загальний екологічний профіль матеріалу. Основними джерелами впливу є:

- споживання невідновлюваних ресурсів (полімери, паливо);

- високі енерговитрати на виробництво;
- утворення парникових та токсичних викидів.

У контексті оцінки життєвого циклу важливо враховувати не лише тип сорбенту, але й джерело енергії, транспортну логістику, ефективність виробничих ліній. Подальше вдосконалення виробничої стадії має бути спрямоване на оптимізацію енерговитрат, перехід до чистої енергії, а також впровадження циркулярних рішень у ланцюгах постачання.

Узагальнена схема потоків матеріалів та енергії на стадії виробництва сорбентів наведено на рис. 3.3.

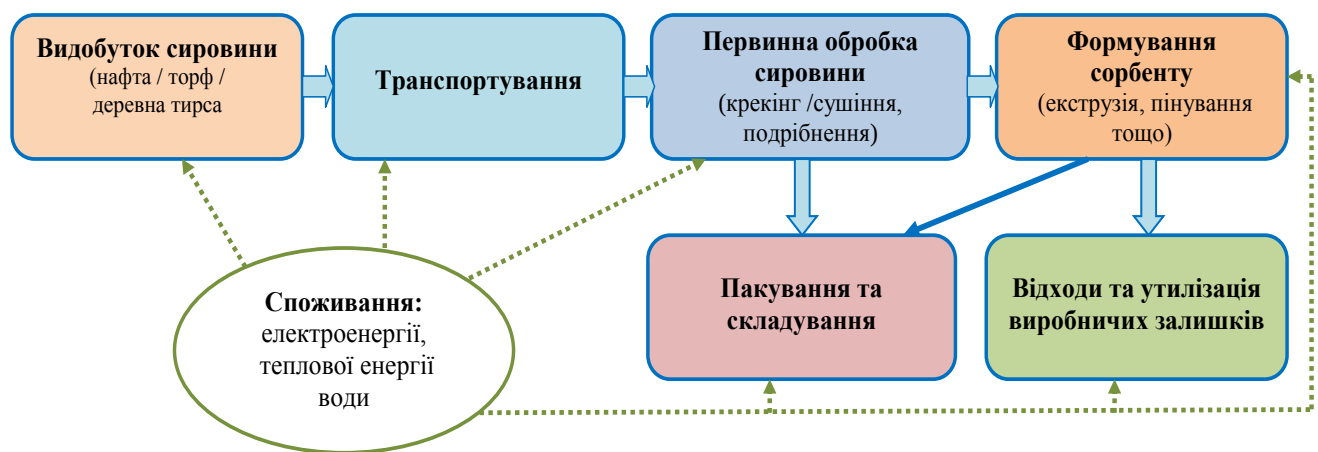


Рис. 3.3. Узагальнена схема потоків матеріалів та енергії на стадії виробництва сорбентів

Для проведення досліджень було обрано три типи сорбентів нафти:

- синтетичний сорбент на основі поліпропіленового волокна;
- природний сорбент на основі модифікованого торфу (висушеного при температурі 100-120°C, що змінює його структуру та підвищує сорбційну здатність);
- сорбент з целюлози, виготовленої з переробленої вторинної рослинної сировини (деревна тирса) (рис. 3.4).



Поліпропіленове
волокно



Модифікований торф



Сорбент з целюлози

Рис. 3.4. Три типи сорбуючих матеріалів

Сорбенти з поліпропіленового волокна широко використовуються у боротьбі з розливами нафтопродуктів завдяки їх високій ефективності, гідрофобності та зручності використання. Особливо актуальні вони в умовах аварійного очищення поверхні води або твердих покриттів..

Поліпропілен – це синтетичний полімер, що виробляється шляхом полімеризації пропілену (похідного нафтової сировини). У виробництві сорбентів використовують тонкодисперсні поліпропіленові волокна, які формуються у неткане полотно або пресуються у гранули, мати, подушки, рулони тощо (табл. 3.2).

Процес включає:

1. Екструзію поліпропілену у тонкі волокна;
2. Термозварювання або хімічне спікання волокон у структуровану масу;
3. Формування готових продуктів різної геометрії.

Таблиця 3.2. Характеристика поліпропіленових сорбентів

Характеристика	Значення / Пояснення
Густина	0,90–0,91 г/см ³ (легше води)
Гідрофобність	Висока – не поглинає воду
Олеофільність	Висока – активно поглинає нафтопродукти
Сорбційна ємність	15–25 кг нафти на 1 кг сорбенту
Температурна стійкість	До +120 °С
Форма випуску	Рулони, мати, бони, подушки, гранули
Можливість багаторазового використання	Частково (при віджиманні або регенерації)

Основними перевагами поліпропіленових сорбентів є:

- висока селективність – сорбують лише гідрофобні речовини (нафту, бензин, мастила), залишаючи воду практично без змін;
- механічна стійкість – не розпадаються у воді, витримують навантаження під час збору;
- легкість – завдяки малій густині плавають на воді;
- зручність використання – швидке та просте розгортання в польових умовах;
- швидка дія – миттєве поглинання рідких вуглеводнів;
- довгий термін зберігання – не псуються за умов правильного зберігання.

Основні недоліки:

- сировина з невідновлюваних джерел, так як поліпропілен виробляють з нафти. Їх виробництво супроводжується викидами парникових газів та споживанням викопного палива;
- погана біорозкладність – у навколишньому середовищі розкладається сотні років;
- після застосування вони стають змішаними відходами (полімер+нафта), що вимагає складної утилізації – зазвичай через інсинерацію (спалювання), що може додатково забруднювати повітря;
- небажаний при довгостроковому екологічному плануванні, так як не відповідає принципам циркулярної економіки;
- нерентабельна багаторазова регенерація. Часто економічно вигідніше утилізувати одразу.

Сорбенти з поліпропіленового волокна – надійний та потужний інструмент для боротьби з нафтовими розливами, особливо в умовах екстрених ситуацій. Вони поєднують легкість, швидкодію, гідрофобність і високу ефективність сорбції. Водночас, з екологічної точки зору, такі матеріали залишають значний екологічний слід, що зумовлює потребу у пошуку біоальтернатив та вдосконаленні технологій утилізації.

Сорбенти з модифікованого торфу – це природні сорбційні матеріали, створені на основі органічної біомаси з високим вмістом гумінових речовин. Завдяки біологічному походженню, високій нафтоємності та відносно низькій вартості, ці сорбенти розглядаються як перспективна альтернатива синтетичним полімерним сорбентам, особливо в контексті циркулярної економіки та біоорієнтованих рішень.

Основною сировиною для виробництва таких сорбентів є торф верхових або перехідних боліт із вмістом органічної речовини понад 90%. Додатково можуть використовуватись деревні волокна або полімерні в'язучі (табл. 3.3).

Метою модифікації є покращення гідрофобних властивостей та підвищення сорбційної ємності. Для цього застосовуються:

- термічна обробка (карбонізація, піроліз);
- імпрегнація гідрофобними агентами (наприклад, силіконом, парафіном);
- гранулювання або формування в матові структури для зручного застосування.

Таблиця 3.3. Характеристика модифікованого торф'яного сорбенту

Параметр	Значення / опис
Походження	Біогенне, відновлюване
Густина насипна	0,15–0,25 г/см ³
Сорбційна ємність по нафті	5–10 кг нафти на 1 кг сорбенту
Гідрофобність (після модифікації)	Висока – від 70 до 90% гідрофобної здатності
Біорозкладність	Висока – до 80% за 6 місяців у компостних умовах
Температурна стабільність	До 150 °C
Форма постачання	Гранули, мати, подушки, брикети

Основними перевагами поліпропіленових сорбентів є:

- екологічність. Торф є природним матеріалом, що розкладається без токсичних залишків;

- висока нафтоємність. Добре поглинає вуглеводні завдяки пористій структурі та високій питомій поверхні;
- низька вартість. Сировина доступна локально в багатьох регіонах України, не потребує складної технології виробництва;
- біорозкладність. Може утилізуватися компостуванням або біодеструкцією після використання;
- можливість модифікації під конкретні умови. Залежно від мети використання, можна варіювати рівень гідрофобності, гранулометричний склад тощо.

Основні недоліки:

- неоднорідність сировини. Якість залежить від родовища, типу болота, ступеня розкладу;
- поглинання вологи при зберіганні. Навіть після модифікації можливе поглинання води з повітря;
- менша механічна міцність. При тривалому використанні структура може руйнуватися;
- пилоподібність. Вимагає додаткових заходів безпеки при зберіганні й роботі;
- обмежена термостійкість. Поступається синтетичним матеріалам у високотемпературних умовах.

Сорбенти з модифікованого торфу відповідають принципам сталого природокористування, оскільки виробляються з відновлюваних ресурсів та не містять токсичних домішок після модифікації. Після використання можуть утилізуватися екологічно безпечними методами (компостування, біоутилізація). Деякі залишки можуть використовуватися як паливо або ґрунтоформуючі добавки після оцінки на токсичність.

Сорбенти з модифікованого торфу – це ефективна, екологічно безпечна та економічно виправдана альтернатива синтетичним сорбентам, особливо у випадках, коли пріоритет надається біоорієнтованим підходам та утилізації без шкоди для довкілля. Попри окремі недоліки, їх широкий потенціал для

локального використання в Україні робить їх важливим елементом у системах ліквідації аварійних нафтових розливів.

Сорбенти з целюлози, зокрема на основі деревної тирси, є природними матеріалами, що активно використовуються для очищення водних та твердих поверхонь від розлитих нафтопродуктів. Їх популярність обумовлена доступністю сировини, біорозкладністю та відносно низькою вартістю. Застосування таких сорбентів особливо актуальне у регіонах з розвинутою деревообробною промисловістю, зокрема в Україні.

Основною сировиною є: тирса з деревини м'яких та твердих порід; відходи деревообробної, меблевої чи целюлозно-паперової промисловості (табл. 3.4).

Щоб підвищити гідрофобні та нафтофільні властивості, тирсу піддають:

- сушінню до вологості не більше 10%;
- термічній або хімічній модифікації (обробка парафінами, силікатами, вуглецевими сполуками);
- грануляції або пресуванню (створення матів, подушок, гранул тощо).

Таблиця 3.4. Характеристика сорбентів із деревної тирси

Параметр	Значення / опис
Тип сировини	Відновлювана, біогенна (целюлоза)
Густина насипна	0,12-0,25 г/см ³
Сорбційна ємність по нафті	2–6 кг нафти на 1 кг сорбенту
Гідрофобність (після обробки)	Середня (до 60–70%)
Біорозкладність	Дуже висока (до 95% за 3-6 місяців)
Температурна стійкість	До 120 °C
Форма випуску	Насипна, гранульована, у матах

Головними перевагами целюлозних сорбентів є:

- доступність сировини. В Україні значна частина відходів деревообробки не використовується, що створює потенціал для дешевої утилізації у вигляді сорбентів;

- біорозкладність. Сорбенти на основі целюлози повністю розкладаються у природному середовищі, не утворюючи токсичних залишків;
- низька вартість виробництва, не потребують дорогих матеріалів або складної техніки для виготовлення.
- легкість утилізації. Використаний сорбент може бути спалений для отримання енергії або компостований.
- можливість використання у локальних системах реагування. Наприклад, для ліквідації розливів на підприємствах, АЗС, у сільському господарстві.

Недоліками таких сорбентів є:

- висока гігроскопічність. Навіть після обробки може вбирати вологу з повітря і води;
- низька гідрофобність без модифікації – не відокремлює нафту від води без обробки;
- може викликати проблеми при зберіганні, транспортуванні в результаті утворення пилу;
- менша ефективність на воді, так як не завжди тримається на поверхні води без додаткових домішок;
- ризик самозаймання при зберіганні, особливо в умовах підвищених температур

Сорбенти з деревної тирси повністю відповідають концепції ресурсозбереження та екологічно безпечного поводження з відходами, оскільки виготовляються з відходів деревообробки, знижуючи їх обсяги. Вони не шкодять довкіллю при розкладанні, а після використання можуть бути утилізовані енергоефективним шляхом (наприклад, піроліз або компостування). Мають низький вуглецевий слід при локальному виробництві та застосуванні.

Целюлозні сорбенти на основі деревної тирси – це екологічно прийнятна та економічно вигідна альтернатива синтетичним матеріалам, особливо для локального використання та невеликих розливів. Попри обмеження, пов'язані з гідрофобністю та сорбційною ємністю, їхня екологічна безпечність,

біорозкладність і доступність роблять їх привабливими для сталих екосистем очищення від нафтопродуктів. Завдяки можливості модифікації, такі сорбенти можуть бути адаптовані під різні умови, підвищуючи їхню ефективність у конкретних сценаріях використання.

За результатами проведеного аналізу сформовані дані інвентаризації життєвого циклу (Life Cycle Inventory) для стадії виробництва трьох досліджуваних типів нафтових сорбентів (табл.3.5). Дані базуються на середньостатистичних показниках з баз даних джерел Ecoinvent, Sphera, PlasticsEurope, IPCC EFDB, ELCD [42, 47, 49, 50] та профільних наукових публікацій [60, 61, 62].

Таблиця 3.5. Дані інвентаризації життєвого циклу для стадії виробництва нафтових сорбентів (на 1 кг готової продукції)

Показник	Поліпропіленовий сорбент	Торф'яний сорбент	Целюлозний сорбент
Сировина	Нафтопродукти (гранули пропілену)	Торф (сушений)	Деревна тріска
Споживання енергії, МДж/кг	35–40	12–16	7–9
– електроенергія, кВт·год	~9,5	~4,2	~3,2
– теплова енергія, МДж	~25	~8	~4,8
Викиди CO ₂ , кг/кг	3,0–4,5	1,0–1,4	0,8-0,9
Викиди ЛОС (леткі органічні сполуки), г	80–120	~10	6
Викиди SO ₂ , г	2-3	0,2-0,5	4
Викиди NO _x , г	2,1–2,5	0,8–1,2	1,2
Водоспоживання, л	20-25	50–60	40-70
Тверді відходи, г/кг	~150	~120	~130
Первинні матеріали, кг	1,2 (ПП-гранули)	1,4 (вологий торф)	0 (або незначно)
Використання відходів або вторинної сировини, кг	0 (або незначно)	0,2–0,3	2,4 (відходів деревообробки)

Подані в таблиці значення визначені з урахуванням таких процесів:

- енергія та викиди подані з урахуванням виробничих процесів (екструзія, подрібнення, сушіння, формування);

- викиди CO_2 охоплюють прямі й непрямі джерела (включаючи енергію);
- ЛОС та NO_x – типові забруднювачі в полімерному виробництві;
- водоспоживання включає процеси охолодження, промивки сировини, зволоження;
- тверді відходи охоплюють залишки після обробки, обрізки, дефектну продукцію.

Поліпропіленовий сорбент має найбільший вуглецевий слід та енергоспоживання. Торф'яний і целюлозний сорбенти є екологічно безпечнішими, але потребують більше сировини на 1 кг сухого матеріалу.

Целюлозні сорбенти виробляються з біомаси другого сорту (з відходів деревообробки), що знижує їхній вуглецевий слід порівняно з синтетичними.

Основне навантаження при виробництві торф'яних та целюлозних сорбентів – енергія для сушіння та подрібнення. Крім цього для целюлозних сорбентів наявне також водне навантаження через промивання волокон. Хімічні реагенти при цьому використовуються в незначній кількості, але можуть давати специфічні викиди (наприклад, SO_2 , ЛОС) (рис. 3.5).

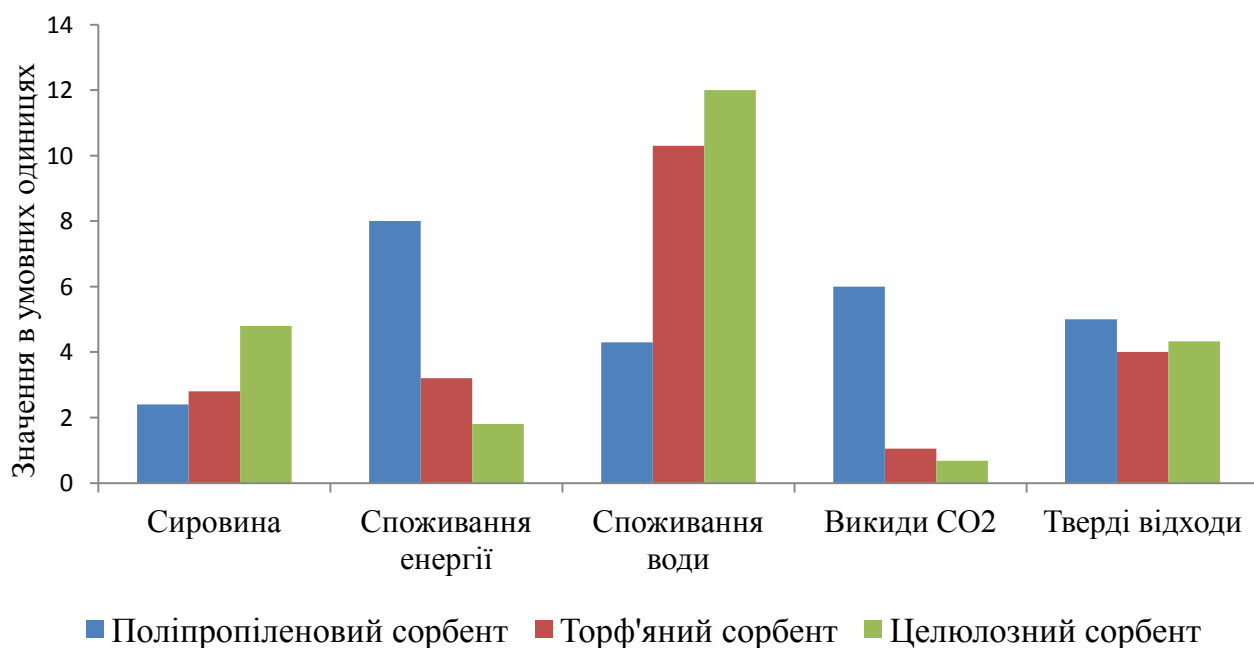


Рис. 3.5. Порівняння показників оцінки життєвого циклу для стадії виробництва різних типів сорбентів (на 1 кг сорбенту)

Таким чином за результатами проведеного аналізу життєвого циклу для стадії виробництва нафтових сорбентів можна відзначити:

- целюлозний сорбент є найбільш екологічним за рахунок відновлюваної сировини при його виробництві, хоча має високий рівень використання та забруднення води;
- торф'яний сорбент має помірний вплив на компоненти довкілля, однак пов'язаний з деградацією болотних екосистем при видобуванні торфу;
- поліпропіленовий сорбент надає найбільше навантаження на довкілля через викопне походження (виробляється з нафти), високу енергоємність і викиди летких органічних сполук, оксидів азоту та вуглекислого газу.

3.4 Стадія використання сорбентів

Стадія використання є ключовою у життєвому циклі нафтових сорбентів, оскільки саме на цьому етапі реалізується їх основне функціональне призначення – поглинання нафтопродуктів із забрудненого водного середовища. Ефективність сорбції визначається не лише хімічними й фізичними властивостями матеріалу, а й умовами середовища, типом нафти, ступенем розливу, температурою, солоністю води та наявністю хвиль.

До основних параметрів, які характеризують ефективність сорбенту, належать:

- сорбційна ємність (г/г або г/см²) – маса нафти, яку здатен утримати один грам сорбенту;
- швидкість сорбції – час, за який досягається максимальне насичення сорбенту;
- стійкість на воді – здатність сорбенту зберігати форму і не розпадатися при контакті з водою;
- селективність – переважне поглинання нафти в присутності води;
- можливість повторного використання після регенерації.

Згідно з дослідженнями, целюлозні сорбенти можуть поглинати до 2–6 г нафти на 1 г матеріалу, торф'яні – до 6–10 г/г, а синтетичні поліпропіленові – до 20–25 г/г [54, 56, 68, 69]

Особливу увагу також приділяють здатності сорбенту діяти в умовах рухомої води, хвиль і вітру. Тут ефективність може знижуватись через вимивання нафтопродуктів або механічне руйнування матеріалу. Тому при виборі сорбенту для практичного застосування в умовах відкритих водойм враховують також його механічну міцність, плавучість і сумісність з технологіями збирання (бони, сітки, пастки).

На цій стадії життєвого циклу виникають і непрямі впливи на довкілля – наприклад, залишки сорбентів, які не були повністю вилучені після використання, можуть забруднювати водні екосистеми або стати джерелом вторинного забруднення. Крім того, ефективність збирання забрудненого сорбенту впливає на подальші витрати енергії та ресурсів на утилізацію.

Загалом, оптимізація ефективності сорбентів на стадії використання має вирішальне значення як з точки зору екологічного впливу, так і економічної доцільності їх впровадження в системи ліквідації розливів нафти.

Зв'язок між ефективністю використання сорбентів у водному середовищі та оцінкою життєвого циклу полягає у тому, що оцінка життєвого циклу охоплює не лише екологічні витрати виробництва та утилізації, а й корисність продукту на стадії його використання (табл. 3.6).

Таблиця 3.6. Зв'язок між ефективністю використання сорбентів та оцінкою їх життєвого циклу

Аспект	Вплив на оцінку життєвого циклу
Сорбційна ємність (г/г)	Чим більше нафти може поглинути 1 кг сорбенту, тим менше його потрібно, а отже менше ресурсів витрачається на виробництво та утилізацію. Отже нижчий екологічний слід.
Швидкість сорбції	Впливає на ефективність аварійного реагування, зменшуючи тривалість розливу. Зменшується шкода довкіллю на етапі використання.

Селективність до нафти	Сприяє точнішому поглинанню саме нафтових забруднень без поглинання води. Відповідно менша маса відходів, економія на транспортуванні та утилізації.
Біорозкладність	Безпосередньо впливає на стадію утилізації: біорозкладні сорбенти менше навантажують сміттєзвалища, не потребують складної термічної утилізації.
Можливість регенерації	Якщо сорбент можна регенерувати і використовувати повторно, то це зменшує потребу в новому виробництві. Відповідно нижче енергоспоживання, викиди, використання води тощо.
Стійкість у воді / Плавучість	Визначає ефективність у реальних умовах аварій, що впливає на загальну екосистемну шкоду. Оцінюється у вигляді непрямих впливів на довкілля.

Таким чином, оцінка життєвого циклу нафтового сорбенту – це не лише підрахунок, скільки CO₂ викинуто на етапі виробництва, а й аналіз того, наскільки ефективно та безпечно цей продукт справляється з ліквідацією нафтових розливів.

Якщо сорбент неефективний – потрібно більше матеріалу, більше енергії, сировини, транспорту, утилізації. Отже виникає більший вплив за всіма категоріями. Навпаки, ефективний та екологічно чистий сорбент дозволяє значно знизити загальний вплив на довкілля протягом усього життєвого циклу.

Порівняння трьох досліджуваних типів сорбентів за LCI-показниками, ефективністю та впливом на компоненти довкілля наведено в табл. 3.7. Ці дані базуються на типових середніх значеннях з наукової літератури та екологічних баз (на 1 кг сорбенту).

Результати аналізу можна визначити наступним чином. Целюлозний сорбент – оптимальний з точки зору сталого розвитку, але потребує більшої кількості матеріалу при аваріях. Поліпропіленовий сорбент – ефективний технічно, але має найгірший профіль в оцінці життєвого циклу з точки зору екологічного впливу. Торф'яний сорбент – компроміс між ефективністю та екологічністю, але видобування торфу шкодить природним екосистемам.

Таблиця 3.7. Порівняння сорбентів за ефективністю та екологічним впливом

Критерій	Целюлозний сорбент	Поліпропіленовий сорбент	Торф'яний сорбент
Ефективність використання нафтового сорбента у водному середовищі			
Сорбційна здатність (г нафти/г сорбенту)	2–6	20–25	8–10
Селективність до нафти	Середня	Висока	Середня
Плавучість	Висока	Висока	Середня
Можливість регенерації	Обмежена	Так (до 5 циклів)	Обмежена
Біорозкладність	Висока	Низька	Висока
Загальний екологічний вплив			
Вплив на зміну клімату	Низький	Високий	Помірний
Енергетичне навантаження	Низьке	Високе	Середнє
Вплив на водні ресурси	Високий	Низький	Середній
Вплив на ґрунти	Низький	Низький	Високий (при видобутку торфу)
Висновок	Екологічно чистий, але менш ефективний	Високо ефективний, але екологічно навантажений	Збалансований, але має ризики деградації екосистем

Створення моделі оцінки життєвого циклу на основі ефективності використання нафтових сорбентів означає, що ми інтегруємо екологічні показники з урахуванням кількості нафти, яку реально абсорбує 1 кг сорбенту. Така модель дозволяє оцінити вплив на 1 кг зібраної нафти, а не на 1 кг сорбенту – що є більш реалістичним у практиці ліквідації розливів.

Модель життєвого циклу на основі ефективності (перерахунок на 1 кг зібраної нафти) формується на основі розрахунків, виконаних в розділі 2 і даних табл. 3.8. Результати наведено в табл. 3.9 і на рис. 3.6.

Таблиця 3.8. Вихідні дані для моделі оцінки життєвого циклу (усереднені значення)

Параметр	Целюлозний	Поліпропіленовий	Торф'яний
Сорбційна здатність, г нафти/г сорбенту	6	25	10
Кількість сорбенту для збирання 1 кг нафти, г	167	40	100
CO ₂ -екв. викиди на 1 кг сорбенту, кг	0,9	4,5	1,4
Енергія на 1 кг сорбенту, МДж	9	40	16
Вода, л на 1 кг сорбенту	70	25	60

Таблиця 3.9. Перерахунок на 1 кг зібраної нафти

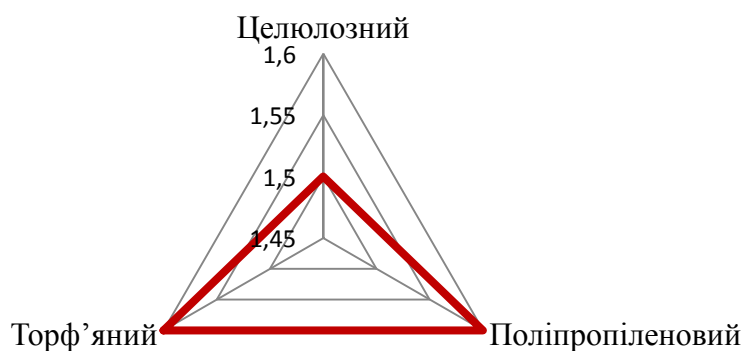
Параметр	Целюлозний	Поліпропіленовий	Торф'яний
Енерговитрати, МДж	1,5	1,6	1,6
Споживання води, л	11,69	1,00	6,0
CO ₂ -екв. викиди, кг	0,148	0,180	0,140

Модель оцінки життєвого циклу на основі ефективності (перерахунок на 1 кг зібраної нафти) інтерпретується наступним чином:

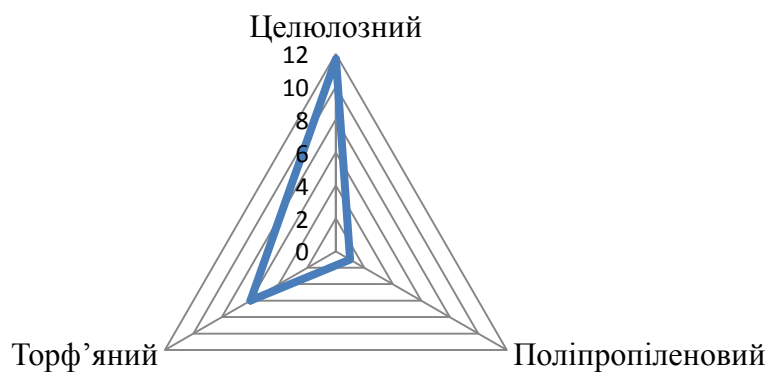
- торф'яний сорбент має найменший вуглецевий слід на 1 кг зібраної нафти, але має однакові енерговитрати з поліпропіленовим сорбентом та негативний вплив на екосистеми через видобуток торфу і порушення водно-болотних угідь;
- целюлозний сорбент посідає середнє положення, але вимагає більше води та матеріалу;
- поліпропіленовий сорбент найефективніший, але має більш високий показник викидів вуглекислого газу.

Модифікований торф порівняно з целюлозним сорбентом є ефективнішим у плані нафтоємності, особливо в аварійних умовах на воді. Але при цьому він може бути дорожчим у підготовці або менш стійким до багаторазового використання, ніж деякі целюлозні аналоги.

Енерговитрати, МДж



Споживання води, л



CO₂-екв. викиди, кг

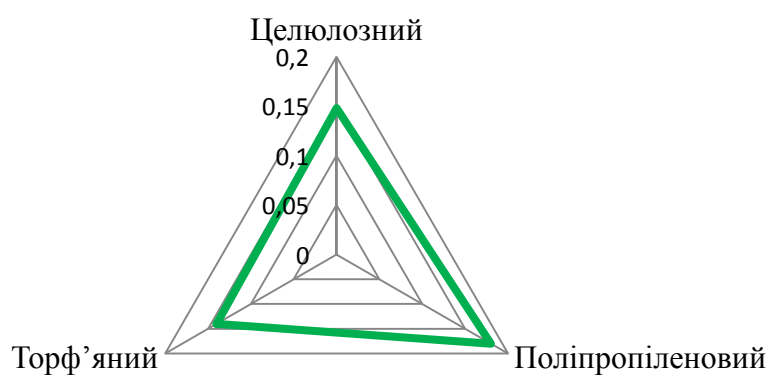


Рис. 3.6. Оцінка екологічного впливу різних типів сорбентів у розрахунку на 1 кг зібраної нафти

Досить часто при аварійних розливах нафти на воді, особливо на великих площах, надають перевагу поліпропіленовим сорбентам (мати, бони, полотна) через поєднання кількох важливих переваг:

- висока гідрофобність і олеофільність. Поліпропілен відштовхує воду та поглинає лише нафту та її похідні. Це критично важливо у водному середовищі, де потрібно вибірково прибирати лише нафту;

- висока сорбційна здатність. Поліпропіленові мати, подушки чи рулони поглинають до 15-25 разів більше за власну масу, тому вони ефективні при великих об'ємах забруднення;

- міцність і стабільність. Не розпадаються у воді, зберігають форму при розміщенні на хвилях чи течії. Зручні для механізованого збирання навіть з великих площ;

- легке транспортування. Випускаються у зручних форматах: рулони, бони, подушки. Мають низьку масу – легко транспортуються у великій кількості;

- стійкість до зовнішніх умов. Не пліснявіють, не гниють, не розкладаються при намоканні або під дією ультрафіолету. Можуть зберігатися роками без втрати властивостей.

При значних перевагах поліпропіленові сорбенти потребують утилізації, так як можуть стати додатковим джерелом пластикових відходів і вторинного забруднення ґрунтів, виробництво поліпропіленових сорбентів супроводжується викидами CO₂ та інших шкідливих речовин.

Враховуючи проведений аналіз в рамках методики оцінки життєвого циклу, треба відзначити, що поліпропіленові сорбенти – є оптимальним вибором при великомасштабних аварійних розливах на воді, коли важлива оперативність, вибірковість до нафти і технічна зручність. Хоча вони й поступаються органічним сорбентам у плані екологічності, їхні експлуатаційні характеристики переважають у надзвичайних ситуаціях.

РОЗДІЛ 4

ЕТАП УТИЛІЗАЦІЇ ТА РЕГЕНЕРАЦІЇ ВИКОРИСТАНИХ СОРБЕНТІВ ТА ІНТЕРПРЕТАЦІЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ОЦІНКИ ЖИТТЄВОГО ЦИКЛУ

4.1 Методи утилізації та регенерації використаних сорбентів нафти

Після завершення основної функції сорбентів з вилучення нафти з водного середовища постає важливе завдання – належна регенерація або утилізація відпрацьованих матеріалів. Обраний спосіб поводження з використаними сорбентами безпосередньо впливає на загальний екологічний слід продукції в межах її життєвого циклу та суттєво змінює результати аналізу за методологією оцінки життєвого циклу.

Методи утилізації. Вибір методу утилізації залежить від складу сорбенту, рівня насиченості нафтою та наявної інфраструктури:

- спалювання у високотемпературних установках (інсинерація) – дозволяє отримати частину енергії, але супроводжується викидами CO₂, NO_x та залишками шлаку. Часто застосовується для полімерних сорбентів, включаючи поліпропілен;
- компостування (для біосорбентів) можливе лише за низької насиченості нафтопродуктами та потребує попередньої біодеградації. У реальних умовах застосовується рідко;
- захоронення на полігонах – найбільш поширена практика в країнах із нерозвиненою інфраструктурою. Призводить до забруднення ґрунтів та підземних вод.

Екологічні аспекти. В контексті оцінки життєвого циклу найбільш сприятливими є органічні сорбенти, які можуть бути утилізовані з найменшим впливом на довкілля – безпечним компостуванням або біодеструкцією. Проте їхня менша ефективність і обмежена регенерація знижують загальну продуктивність. Синтетичні сорбенти, навпаки, забезпечують високу ефективність, але мають суттєві екологічні ризики на стадії утилізації — особливо при спалюванні.

У порівняльному аналізі в рамках оцінки життєвого циклу важливо враховувати також можливість енергетичної утилізації, повторного використання або перероблення, оскільки це дозволяє частково компенсувати початковий вплив на довкілля (табл. 4.1).

Таблиця 4.1. Порівняння методів утилізації нафтових сорбентів

Метод утилізації	Типи сорбентів	Екологічний вплив	Доцільність застосування
Спалювання (інсинерація)	Поліпропіленові, мінеральні	Високі викиди CO ₂ , NO _x ; утворення золи; потреба в очищенні димових газів	Висока (при наявності установок високотемпературного спалювання)
Механічне віджимання та повторне використання	Полімерні, синтетичні	Помірний вплив; зменшення кількості відходів; потрібна енергія на переробку	Висока (економічно вигідно для дорогих сорбентів)
Біодеструкція / компостування	Целюлозні, торф'яні, органічні	Низький рівень впливу, при дотриманні умов біорозкладу	Середня (потребує контролю забруднення і часу)
Захоронення на полігонах	Усі типи (як крайній варіант)	Високий ризик забруднення ґрунтів та вод, утворення фільтрату	Низька (лише у відсутності альтернатив)
Термічна десорбція з рекуперацією нафти	Дорогі полімерні, мінеральні сорбенти	Помірний/високий енергоспоживання; можливість повторного використання	Висока (для великих обсягів; економічно доцільно)
Переробка на альтернативне паливо	Синтетичні, поліпропіленові, целюлозні, торф'яні	Залежить від технології; дозволяє частково відновити енергію	Середня (при наявності відповідної інфраструктури)

Примітка. Висока доцільність – метод економічно виправданий і має керований екологічний вплив. Середня доцільність – можливий до застосування за певних умов. Низька доцільність – тимчасове або вимушене рішення, яке бажано уникати.

Найбільш дешевим є метод захоронення або розміщення на спеціальних полігонах відпрацьованих сорбентів. Такі «склади» негативно впливають на стан довкілля, рослинність та тварин. Крім того, згодом спостерігається десорбція нафтопродуктів із сорбентів, а отже, відбувається вторинне

забруднення навколишнього середовища, особливо небезпечне в цьому випадку потрапляння вуглеводнів у підземні води.

Спалювання відпрацьованих сорбентів може запобігти вторинному забрудненню середовища, але при цьому втрачається сам продукт – нафта, що тягне за собою додаткові витрати та втрату прибутку. Будь-яке підприємство - винуватець забруднення, прагне якнайшвидше зібрати розлив, але при цьому зменшити витрати. Крім того, не завжди є можливість спалити сорбент, наприклад, у випадку з мінеральними або полімерними сорбентами (при нагріванні розплавляються і забивають колосникові решітки). Кінцевим продуктом є зола, яка використовується як будматеріали.

Важливо використовувати або матеріали багаторазової дії, здатні до регенерації шляхом віджиму, або сорбенти з природної органічної сировини (рослинні відходи, торф), які можна просто спалити або прискорити біодеградацію при додаванні відомих комерційних біопрепаратів. Отже, перші дві вимоги до нафтосорбенту – можливість багаторазової регенерації шляхом віджиму та відносна легкість утилізації.

Вимоги до сорбентів з точки зору їх утилізації. Вибір сорбентів для ліквідації нафтових розливів має враховувати не лише їх адсорбційні властивості, але й подальші аспекти утилізації після насичення нафтою. Це обумовлено як екологічними міркуваннями, так і економічною доцільністю процесів регенерації чи знешкодження. З огляду на це, до нафтових сорбентів висувається низка вимог, які забезпечують ефективне управління їх життєвим циклом.

1. Нетоксичність та екологічна безпечність після використання.

Сорбенти повинні бути хімічно інертними і не виділяти токсичних сполук при утилізації або спалюванні. У разі потрапляння у ґрунт чи воду використаний матеріал не повинен спричиняти додаткове забруднення довкілля. Важливо, щоб утворені після термічної обробки або біодеградації продукти не створювали нових ризиків.

2. Придатність до регенерації. Оптимальним є застосування сорбентів, які можна багаторазово відновлювати без суттєвого зниження ефективності. Матеріали мають зберігати фізичні та хімічні властивості після термічного, хімічного чи біологічного очищення. Це дозволяє зменшити кількість відходів і загальні витрати на ліквідацію забруднень.

3. Мінімальний залишковий вміст нафти після первинної регенерації. Після очищення сорбенту важливо, щоб залишковий вміст нафти був мінімальним і не перевищував допустимих норм згідно з екологічними стандартами. Це гарантує можливість його безпечного повторного використання або подальшої утилізації.

4. Здатність до повної або часткової біодеградації. Особливо цінними є біосумісні сорбенти на основі природних матеріалів (торф, целюлоза, лушпиння, солома), які можуть розкладатися природним шляхом після використання або бути об'єктом біоре mediaції. Такі сорбенти не потребують енергомісткої утилізації й відповідають принципам зеленої хімії.

5. Енергетична доцільність утилізації. Сорбенти повинні мати достатню теплотворну здатність, якщо планується їх утилізація шляхом спалювання. Наприклад, полімерні сорбенти мають високу калорійність і можуть використовуватись як альтернативне паливо в цементній промисловості або ТЕЦ.

6. Низьке утворення вторинних токсичних продуктів при спалюванні. Матеріали не повинні містити галогеновмісних або важких металів, які під час згоряння утворюють діоксини, фурани та інші небезпечні сполуки. Утилізація сорбентів має відповідати вимогам національного законодавства та міжнародних екологічних стандартів (зокрема Базельської конвенції).

7. Можливість безпечного транспортування після використання. Після адсорбції нафти сорбент стає небезпечним вантажем. Тому важливо, щоб він мав стабільну структуру, не витікав, не займав надто великого об'єму та не

створював додаткових ризиків при зберіганні й перевезенні до місця утилізації або переробки.

Таким чином, впровадження та використання сорбентів, які відповідають вищенаведеним вимогам, є важливою умовою для ефективного управління нафтовими відходами, зменшення навантаження на довкілля та досягнення цілей сталого розвитку в галузі ліквідації аварійних розливів.

Підходи до регенерації. Регенерація передбачає повторне використання сорбенту після видалення з нього нафтопродуктів. Основні методи включають:

- механічне віджимання – дозволяє частково видалити нафту зі сорбенту, однак підходить лише для гідрофобних матеріалів (наприклад, поліпропілену). Ефективність повторного використання після 1–2 циклів різко знижується;
- низькотемпературний (тепловий) метод – нагрівання парою або в інертній атмосфері до 100-400°C;
- високотемпературний (термічний) метод – термічна деструкція за температури 650-920°C;
- мікробіологічний – деструкція нафтопродуктів мікроорганізмами;
- реагентний – екстрагування за допомогою органічних розчинників (рис. 4.1).

Переваги та недоліки даних методів представлені в табл. 4.2.

Таблиця 4.2. Порівняння методів регенерації нафтосорбентів

Метод регенерації	Переваги	Недоліки
Високо-температурний	Простота експлуатації. Утворення вторинного сорбенту. Газоподібні речовини, що утворюються, є паливом і можуть застосовуватися як синтез-газ.	Утворення рідких продуктів термообробки, які потрібно утилізувати.
Низько-температурний	Низькі витрати. Можливість виділити без деструкції легкокиплячі фракції нафти.	1/3 частина всіх адсорбованих речовин (важких фракцій) залишається у сорбенті. Не забезпечує повного відновлення

Метод регенерації	Переваги	Недоліки
Механічний	Простота експлуатації. Можливість виділити нафтопродукти без декструкції.	Не застосовується до вуглецевих сорбентів через низьку міцність і високу пористість останніх.
Мікробіологічний	Повна регенерація сорбенту	Висока ціна. Висока тривалість (кілька діб та більше).
Реагентний	Невисокі температури	Висока ціна. Необхідність регенерації чи утилізації реагентів.

Не всі сорбенти підлягають ефективній регенерації. Наприклад, целюлозні та торф'яні матеріали зазвичай утилізуються після одноразового використання, оскільки втрачають сорбційну здатність та можуть розкладатися.

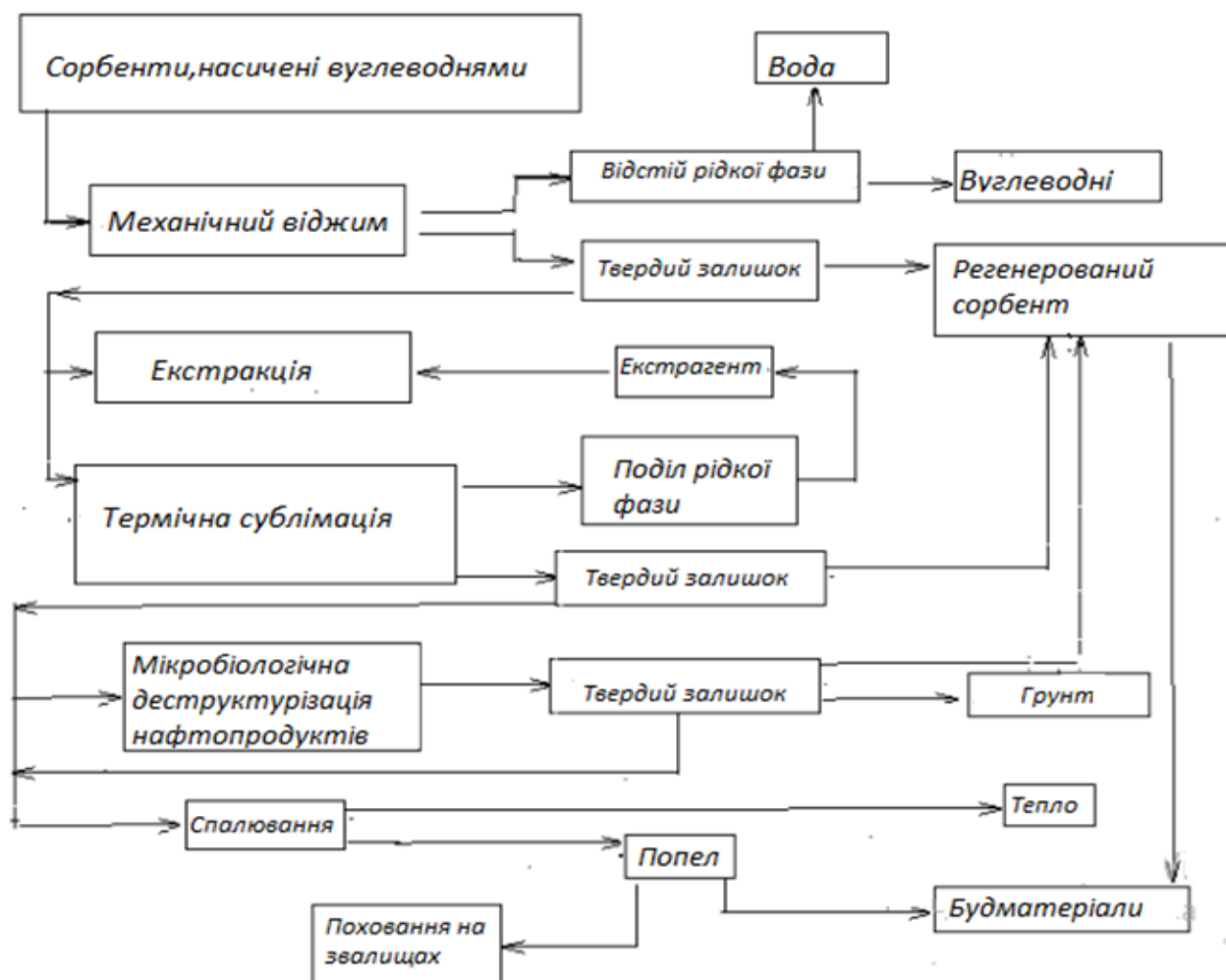


Рис. 4.1. Схема можливих варіантів регенерації сорбентів після збирання нафтових забруднень

За кращими способами регенерації та подальшої утилізації нафтові сорбенти розподіляються таким чином:

- віджимання-спалювання – бавовняні волокнисті, синтетичні волокнисті;
- віджимання-захоронення – об'ємно-пористі, синтетичні, графітові;
- випал-захоронення – кремнеземисті, шарувато-силікатні;
- спалювання – вугільні, лігнінові;
- біорозкладання – природні волокнисті, торф'яні.

Механічні (компресійні) методи регенерації: віджимання на центрифугі, на фільтр-пресі з промиванням тощо, підходять у випадку полімерних матеріалів, а у випадку з вуглецевими нафтосорбентами, взагалі не застосовується через значну пористість і відносно низьку міцність. Наприклад, пристрій механічний віджимний представлено на рис. 4.2 і в табл. 4.3.



Рис. 4.2. Пристрій механічний віджимний для регенерації нафтосорбентів

Таблиця 4.3. Технічні характеристики пристрою механічного віджимання

Показник	Значення
Габаритні розміри, мм	
довжина	630
ширина(зі знятою ручкою)	710(580)
висота	1125
Розмір матеріалів, що віджимаються,мм	
ширина	500
висота	до 70

Пристрій механічний віджимний призначений для механічного віджиму сорбуючих виробів (сорбуючі бони, серветки, подушки, рулони, пластини і т.п.) шириною до 500мм і товщиною не більше 70мм для повторного

використання. Застосування пристрою дозволяє суттєво знизити витрати сорбуючих виробів при ліквідації аварійних розливів, а також витягти до 70% зібраного цільового продукту. Пристрій приводиться в дію механічно обертанням рукоятки самозахоплюючих валів. Привід здійснюється на обидва вали. Сила стиснення валів регулюється. У комплект поставки входить: вижимний пристрій; перехідник у вигляді насадки на стандартну 200 літрову бочку, що дозволяє віджимати сорбуючі вироби безпосередньо в ємність; чохол для зберігання, що запобігає попаданню води та пилу на механізм пристрою.

Для нафтосорбентів застосовуються також методи низькотемпературної, термічної та хімічної регенерації. Низькотемпературний (тепловий) метод ґрунтується на нагріванні відпрацьованого сорбенту паром або інертними газами до температури 100-400°C.

Високотемпературний метод (термічний) проводиться за умов, наближених до умов отримання сорбенту, при цьому сорбат також піддається термодеструкції з виділенням летких і конденсуються продуктів піролізу та утворенням вторинного вуглецевого залишку. Оптимальні умови застосування термічних і електротермічних регенерацій: температура 650-920°C, вміст у реактивуючому середовищі кисню - 0,1-2%, водяної пари - 2-30%, час термообробки при температурах вище 500 °C - 2-20 хв. Сорбційна активність після регенерації сорбенту практично повністю відновлюється або навіть на 5-30 % може перевищувати активність вихідного матеріалу через закоксованість поверхні вихідного сорбенту сорбованими вуглеводнями.

Хімічна обробка відпрацьованих сорбентів рідкими (розчинниками) або газоподібними реагентами при температурах до 100°C призводить до десорбції або деструкції сорбату. Загальним недоліком описаних способів є проблема збору та утилізації сорбентів після адсорбції нафтових продуктів, тому на сьогоднішній день рідко застосовуються. Як реагентів застосовують розчини ПАР, бензин і гас, гексаном і хлороформом тощо.

Ще один метод – це метод мікробіологічної деструкції сорбованої нафти та сорбенту. Недоліком даного способу є його складність та тривалість (кілька діб і більше), пов'язана з необхідністю культивування мікроорганізмів.

Використовуючи зазначені методи, організацію регенерації нафтоорбентів можна провести наступним чином: відпрацьований нафтосорбент піддають низькотемпературній обробці, при якій легкі та середні фракції нафти виганяють, а надалі конденсують і використовують за призначенням. Сорбент з важкими фракціями, що залишилися в порах, можна піддати одному з трьох методів: реагентного очищення, високотемпературної обробки (піроліз) або спалити при отриманні теплової енергії.

Таким чином в результаті використання кожного з цих методів отримуються різні продукти. При реагентному очищенні одержуємо знову нафтосорбент, але необхідно продумати подальшу технологію використання та утилізації суміші реагентів та нафтопродуктів. При піролізі маса нафтосорбенту не тільки не втрачається, а навпаки, зростає за рахунок коксування в сорбенті важких фракцій, при цьому необхідно вивчити зміну сорбційних властивостей нафтосорбенту в процесі регенерації.

4.2 Порівняльний аналіз та екологічні аспекти використання відпрацьованих нафтових сорбентів в енергетичних цілях (спалювання)

Після виконання своєї функції з поглинання нафтопродуктів сорбенти стають потенційно небезпечними відходами, які потребують належної утилізації. Одним з найбільш поширених і ефективних способів поводження з такими відходами є енергетична утилізація – спалювання з отриманням теплової енергії. Цей метод дозволяє зменшити обсяг відходів, утилізувати нафтопродукти, поглинені сорбентом, а також частково компенсувати витрати за рахунок отримання енергії.

Розглянемо утилізацію шляхом спалювання, яка застосовується до трьох досліджуваних типів нафтових сорбентів: поліпропіленових (синтетичних); з модифікованого торфу; целюлозних (з деревної тирси).

Для ефективного та безпечного спалювання сорбентів важливо дотримуватися таких умов:

- температура спалювання – 800-1200°C;
- наявність системи очищення димових газів – циклон, фільтри, скрубери;
- контроль за емісією – CO₂, CO, NO_x, SO₂, HCl, важкі метали, залишки ПАВ та продуктів згоряння нафти.

Аналіз результатів спалювання за типами сорбентів наведено нижче.

Поліпропіленові сорбенти (синтетичні, виготовлені з вуглеводнів нафтопереробки):

- потенціал енергії при спалюванні – 40–46 МДж/кг;
- переваги – висока теплотворна здатність;
- недоліки – утворення токсичних газів (NO_x, CO, HCl). Пластик димить, тому існує потреба у складній очистці газів.

Сорбенти з модифікованого торфу (природний органічний матеріал, модифікований для гідрофобності):

- потенціал енергії – 15-18 МДж/кг.
- переваги - відносно чисте згоряння, природне походження, мала кількість золи.
- недоліки - нижча теплота згоряння порівняно з поліпропіленом, можливі запахи.

Сорбенти з целюлози (деревна тирса, залишки деревини, іноді модифіковані парафінами чи іншими домішками).

- потенціал енергії – 13-17 МДж/кг;
- переваги – екологічність, низький вміст сірки;

- недоліки – висока зольність при наявності мінеральних домішок, потреба у сушінні.

Обсяги викидів забруднюючих речовин та деякі показники при енергетичному спалюванні різних типів сорбентів наведено в табл. 4.4.

Таблиця 4.4. Основні викиди при спалюванні використаних нафтових сорбентів (на 1 тону сорбенту)

Показник / Вид сорбенту	Поліпропіленовий	Торф'яний	Целюлозний (тирса)
CO ₂ , кг	3000–3400	1800–2200	1300–1500
CO, кг	20–30	10–15	8–12
NO _x , кг	5–8	2–4	2–3
SO ₂ , кг	0,1–0,2	0,2–0,5	<0,1
HCl, г	800–1200	<50	<30
Зола, кг	<5	30–60	20–40
Теплотворна здатність, МДж/кг	42–46	15–18	13–17
Вміст вологи, %	0–2	10–20	10–25
Біорозкладність залишку	Ні	Так	Так

Таким чином, поліпропіленові сорбенти мають найвищу теплотворну здатність, що робить їх привабливими з енергетичної точки зору. Проте вони вимагають суворого контролю за емісіями шкідливих речовин, оскільки під час згоряння утворюють багато токсичних компонентів.

Торф'яні сорбенти поєднують помірну енергоефективність із природним походженням. Їхнє спалювання супроводжується меншою кількістю небезпечних викидів, а зольний залишок може частково використовуватись як добриво або рекультиваційний матеріал.

Целюлозні сорбенти є найменш енергомісткими, але мають високий екологічний потенціал. Викиди при їх спалюванні є мінімальними, особливо якщо матеріал не містить хімічних модифікаторів.

Треба також зазначити певні рекомендації щодо способів спалювання різних типів сорбентів. Для великих обсягів поліпропіленових сорбентів доцільно використовувати інсинератори з системами багатоступеневого очищення газів. Для торф'яних і тирсових сорбентів рекомендується спалювання в твердопаливних котлах як біопаливо, за умови контролю вологості. Спалювання будь-яких сорбентів має здійснюватися в межах ліцензованих установок з моніторингом складу викидів, відповідно до вимог сучасних передових технологій, нормативно-законодавчих актів України та директив ЄС.

4.4 Інтерпретація результатів оцінки життєвого циклу та пропозиції щодо його оптимізації

Оцінка життєвого циклу нафтових сорбентів дозволяє здійснити всебічний аналіз впливу кожного етапу їхнього існування (від видобутку сировини до утилізації) на навколишнє середовище. У дослідженні було проаналізовано три основні типи сорбентів: поліпропіленові, сорбенти з модифікованого торфу та целюлозні сорбенти на основі деревної тирси. На основі результатів оцінки життєвого циклу здійснено комплексне порівняння їх екологічного сліду, ресурсоемності та потенціалу до повторного використання чи енергетичної утилізації.

Поліпропіленові сорбенти. Оцінка життєвого циклу показала, що на стадії виробництва поліпропіленові сорбенти мають найвищий рівень енергоспоживання та викидів парникових газів через використання сировини нафтового походження та енергоємних процесів екструзії та спінювання. Разом з тим, ці сорбенти характеризуються високою нафтоємністю, стійкістю до дії агресивного середовища та зручністю застосування в умовах аварій. Проте, етап утилізації, зокрема спалювання, створює потенційні екологічні ризики через утворення діоксинів, NO_x , HCl та інших токсичних сполук. Біодеградація відсутня, а рециклінг ускладнений наявністю поглинутої нафти.

Сорбенти з модифікованого торфу. Оцінка життєвого циклу вказує на відносно низький вплив на довкілля на всіх етапах – за винятком добування торфу, який пов’язаний із деградацією торфовищ, втратою вуглецевих запасів і порушенням водно-болотних екосистем. Водночас торф’яні сорбенти є біорозкладними, частково відновлюваними і не створюють критичних викидів при спалюванні. Зольний залишок може бути використаний у сільському господарстві. Модифікація гідрофобними реагентами збільшує ефективність, але дещо ускладнює природне розкладання. Загалом, торф’яні сорбенти мають збалансований екопрофіль і можуть бути адаптовані до концепції циркулярної економіки.

Целюлозні сорбенти з деревної тирси. Аналіз показав, що виробництво цих сорбентів має найнижче енергоспоживання, оскільки базується на вторинній сировині – відходах деревообробки. Це робить їх особливо привабливими в контексті екологічної ефективності. Висока біорозкладність, помірна нафтоємність та низький рівень токсичних викидів при утилізації – основні переваги. Проте, ефективність у збиранні розлитої нафти поступається іншим видам сорбентів. Модифікація для підвищення гідрофобності може покращити характеристики, але потребує додаткових технологічних витрат.

Ідентифікація «гарячих точок» (англ. *hot spots*) є ключовим етапом аналізу життєвого циклу, що дозволяє визначити стадії або процеси, які мають найбільший негативний вплив на довкілля. На основі зібраних інвентаризаційних даних та інтерпретації результатів оцінки впливів, можна зробити висновки щодо найбільш проблемних ділянок у життєвому циклі нафтових сорбентів, які представлені в табл. 4.5.

Таблиця 4.5. Виявлення «гарячих точок» на всіх етапах життєвого циклу сорбентів нафти

Тип сорбенту	Етапи життєвого циклу		
	Видобуток сировини та виробництво	Використання сорбентів	Регенерація та утилізація
Поліпропіленовий сорбент	Високе енергоспоживання (до 40 МДж/кг), значні викиди парникових газів (близько 4,5 кг CO ₂ -екв/кг) через використання нафтопродуктів при виробництві сорбента	–	Спалювання створює вторинні викиди високотоксичних діоксинів та CO ₂
Сорбент з модифікованого торфу	При видобутку сировини – деградація екосистем, втрати біорізноманіття, високі викиди CO ₂ внаслідок окиснення органічної речовини	–	Ускладнене компостування та біорозкладання через накопичення вуглеводнів
Целюлозний сорбент (з деревної тирси)		Невисока нафтоємність (до 6 г/г) та підвищене водопоглинання, що знижує ефективність при сильних хвилюваннях.	За умов неефективного біорозкладання – ризик утворення метану.

Для інтепритації результатів згідно методології оцінки життєвого циклу виконується порівняння за ключовими категоріями впливу:

- глобальне потепління (CO₂-екв.);
- енергоспоживання (МДж);
- евтрофікація та забруднення водних ресурсів;
- токсичність для людини;
- потенціал фотохімічного смогу.

Виконано зважену оцінку екологічного впливу трьох типів нафтових сорбентів відповідно до підходів ISO 14044 (Life Cycle Impact Assessment), із використанням зважування для порівняння агрегованих впливів на довкілля на 1 кг зібраної нафти, а також з урахуванням етапу утилізації – енергетичного

спалювання використаних сорбентів. Зважування важливості категорій впливу розподілене таким чином: викиди CO_2 – 40%, енергоспоживання – 30%, використання води – 30%. Нормалізація – це масштабування до максимального значення по категорії (наприклад, поліпропілен має найвищі викиди CO_2 – 0,332, тому нормалізоване значення інших показників – це їхнє відношення до 0,332) (табл. 4.6, рис. 4.3).

За результатами зваженої оцінки екологічного впливу трьох типів нафтових сорбентів протягом всього життєвого циклу найкращий результат (найнижча загальна оцінка) – у целюлозного сорбенту. Найгірший результат у поліпропіленового сорбенту, через високі викиди та енергозатрати. Торф'яний сорбент має проміжну позицію, але екологічно гірший за целюлозний.

Таблиця 4.6. Зважена оцінка екологічного впливу нафтових сорбентів (методика ISO 14044)

Категорія впливу	Одиниця	Нормалізація	Вага	Целюлозний	Поліпропіленовий	Торф'яний
Викиди CO_2 -екв.	кг CO_2 -екв.	0,332	0,4	0,172	0,531	0,240
Енергоспоживання	МДж	8,3	0,3	0,155	0,300	0,202
Водоспоживання	л	8,6	0,3	0,300	0,073	0,262
Сумарна зважена оцінка	–	–	1,0	0,627	0,904	0,704

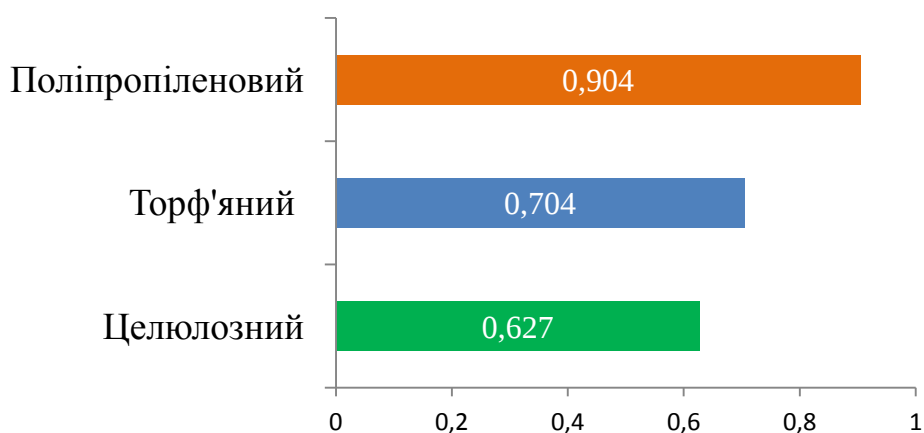


Рис. 4.3. Зважена оцінка екологічного впливу нафтових сорбентів протягом повного життєвого циклу

Ідентифікація "гарячих точок" та інтерпретація отриманих результатів дозволяє здійснити перехід від простої оцінки екологічного сліду до практичних кроків оптимізації. За рахунок впровадження ресурсозберігаючих та екологічно безпечних рішень можливо суттєво знизити сумарний вплив нафтових сорбентів на довкілля, зберігаючи їхню функціональну ефективність у боротьбі з розливами нафти.

Розроблені наступні пропозиції щодо оптимізації життєвого циклу нафтових сорбентів в контексті забезпечення екологічної безпеки, енерго- та ресурсоефективності.

1. Для поліпропіленових сорбентів:

- перехід на вторинну сировину або біополімери для зменшення впливу на стадії виробництва;
- використання технологій низькотемпературної переробки із рекуперацією енергії;
- використання добавок, що зменшують утворення токсичних газів при спалюванні використаних сорбентів.

2. Для торф'яних сорбентів:

- використання торфу лише з деградованих або меліорованих земель (з мінімізацією впливу);
- при утилізації в енергетичних цілях бажано використання зольного залишку як ґрунтового покращувача;
- удосконалення технологій виробництва сорбенту на основі торфу з додаванням мікробних біопрепаратів, що підвищує біорозкладність та не вимагає утилізації сорбенту.

3. Для целюлозних сорбентів:

- модифікація волокон для зменшення гідрофільності (наприклад, хімічне зшивання);
- підвищення ресурсу сорбції за рахунок обробки наноматеріалами або поверхневою функціоналізацією;

- інтеграція у системи біоутилізації (компостування, біогазові установки).

4. Універсальні рішення:

- впровадження багаторазового використання сорбентів після регенерації (наприклад, центрифугування або промивання);
- вибір оптимального методу утилізації залежно від типу сорбенту та умов збирання;
- локалізація виробництва для зменшення логістичних впливів.

Результати оцінки життєвого циклу вказують, що немає універсального «найкращого» сорбенту, але оптимальний вибір залежить від умов використання, масштабу розливу, екологічних пріоритетів та наявної інфраструктури утилізації. Найбільш перспективним напрямком є перехід до біосумісних, поновлюваних та придатних до повторного використання матеріалів, розроблених з мінімізацією шкідливих впливів протягом усього життєвого циклу.

РОЗДІЛ 5

ЕКОНОМІЧНА ОЦІНКА МЕТОДІВ УТИЛІЗАЦІЇ ТА РЕГЕНЕРАЦІЇ ВИКОРИСТАНИХ СОРБЕНТІВ НАФТИ

5.1 Економічна доцільність методів утилізації та регенерації сорбентів нафти

Утилізація та регенерація використаних нафтових сорбентів є критично важливими не лише з екологічної, але й з економічної точки зору. Ефективне управління відходами сорбентів дозволяє зменшити навантаження на навколишнє середовище, знизити витрати на закупівлю нових матеріалів і забезпечити стале використання ресурсів. Економічна оцінка таких методів передбачає аналіз капітальних та поточних витрат, ефективності повернення ресурсів, вартості енергії, обробки залишкових відходів, а також потенційного прибутку або економії від повторного використання сорбентів.

Економічна оцінка методів утилізації та регенерації нафтових сорбентів є важливим інструментом для вибору оптимальної технології поводження з відпрацьованими матеріалами. Вона базується на співставленні витрат на реалізацію технології, ефективності очищення, можливості повторного використання сорбентів та потенційного зменшення екологічних штрафів або витрат на утилізацію небезпечних відходів.

Основні економічні фактори, які враховуються при виборі методу наступні:

- вартість енергоресурсів (електроенергія, паливо);
- вартість обладнання і витратних матеріалів;
- рівень зносу або деградації сорбенту після регенерації;
- вартість утилізації залишків після очищення;
- кількість циклів повторного використання сорбенту;
- вартість закупівлі нового сорбенту (для порівняння);

- витрати на екологічний контроль, ліцензування, утилізацію згідно із законодавством (табл. 5.1).

Таблиця 5.1. Порівняльна таблиця економічної доцільності методів

Метод регенерації/утилізації	Орієнтовна вартість (\$/1 кг сорбенту)	Кількість повторних циклів	Економія порівняно з новим сорбентом (%)	Вартість утилізації залишку (\$/кг)	Загальна доцільність
Методи регенерації					
Механічний	0,20–0,35	1–3	30–50%	0,05–0,10	Висока
Низькотемпературний	0,50–1,20	2–4	50–70%	0,10–0,15	Висока
Високотемпературний	1,50–2,80	3–5	60–80%	0,20–0,40	Середня
Мікробіологічний	0,10–0,30	1–2	30–60%	0,02–0,05	Висока
Хімічний реагентний (з розчинниками)	1,00–2,50	3–5	40–70%	0,30–0,50	Середня–низька
Методи утилізації					
Захоронення (без регенерації)	0,80–1,50 (утилізація без відновлення)	0	0%	-	Низька
Спалювання в енергетичних цілях	0,2-0,4	0	95-99%	-	Висока

За результатами аналізу табл. 5.1 можна зробити наступні висновки. Механічні методи – найдешевші, проте дають короткий життєвий цикл сорбенту та неповне очищення. Низькотемпературна регенерація забезпечує високу якість очистки з мінімальною деградацією сорбенту, що дозволяє повторне використання до 4 циклів. Високотемпературна регенерація ефективна для неорганічних матеріалів, однак вимагає значних витрат на енергію та фільтрацію викидів. Мікробіологічний підхід є найдешевшим та екологічним, особливо для природних сорбентів, проте вимагає більше часу.

Хімічний реагентний метод дорогий через використання органічних розчинників та складність їх подальшого очищення. Захоронення без спроб регенерації в довгостроковій перспективі є екологічно та економічно недоцільним через плату за небезпечні відходи та втрату матеріалу (рис. 5.1).

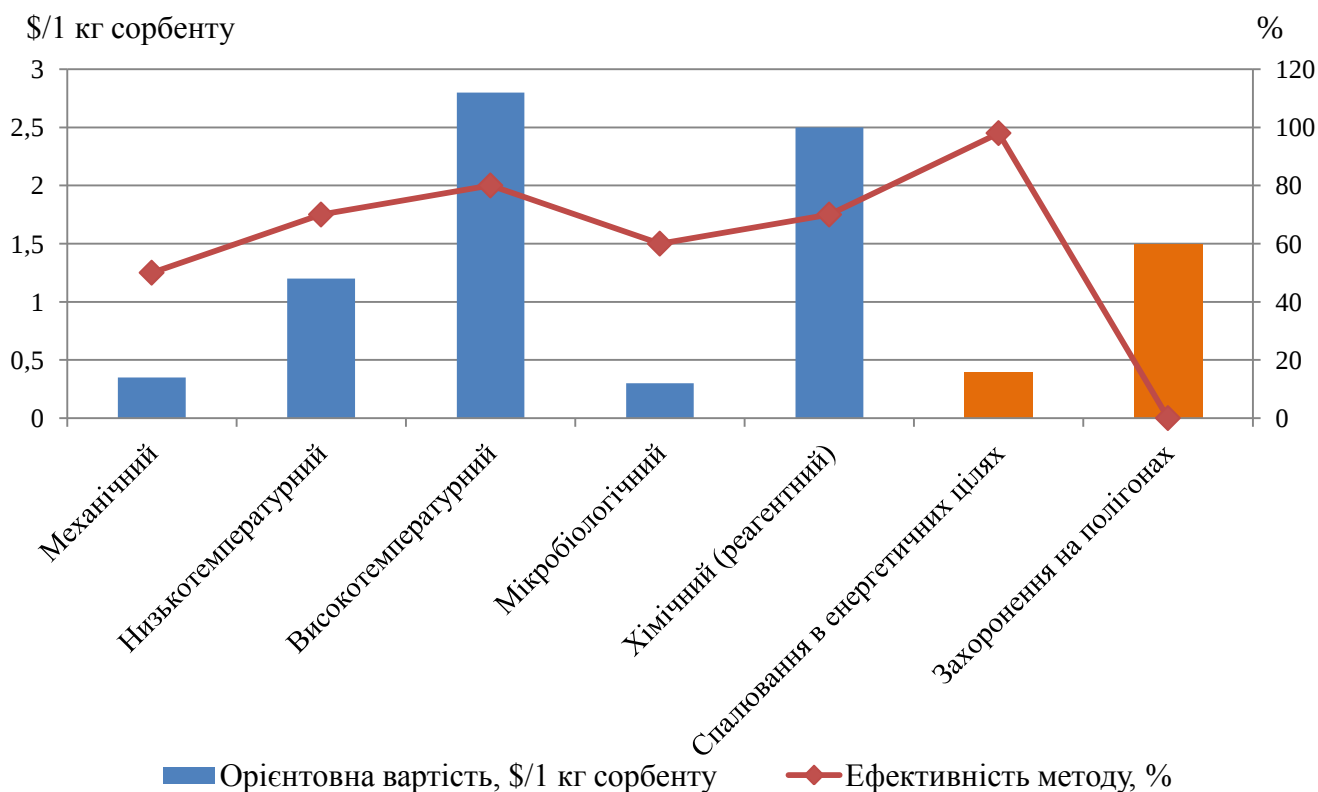


Рис. 5.1. Орієнтовна вартість та ефективність методів регенерації та утилізації сорбентів нафти

З економічної точки зору для різних типів сорбентів найбільш доцільними є такі методи регенерації сорбентів:

- низькотемпературна регенерація – для мінеральних і синтетичних сорбентів.
- мікробіологічна регенерація – для біосорбентів (торф, тирса, солома).
- механічні методи – як первинна обробка у польових умовах або попередній етап перед іншим методом (рис. 5.1, рис. 5.2).

Метод утилізації сорбентів, такий як спалювання з отриманням енергії має такі особливості:

- підходить для всіх типів сорбентів, зокрема для торф'яних та целюлозних;
- вартість залежить від технології: високотемпературні печі, енергетичні установки;
- перевага: знищення токсичних залишків, утилізація з виробленням енергії;
- недолік: утворення викидів CO₂ та інших забруднювачів, що спричиняє потребу у фільтрації відхідних газів;
- доцільність висока у разі великих обсягів і централізованої інфраструктури.

Таким чином найбільш розповсюдженими та з економічної точки зору, найбільш вигідними методами є механічна регенерація та термічна утилізація. Перший варіант доцільний у випадках, коли потрібна швидка та недорога обробка сорбентів з можливістю повторного застосування. Термічна утилізація (спалювання в енергетичних цілях) є найбільш ефективною у випадку значного забруднення та великих обсягів використаних сорбентів. Біологічна утилізація вигідна при використанні природних сорбентів у невеликих масштабах, а хімічна – практично не застосовується у великій промисловості через високу собівартість.

Для прийняття остаточного рішення щодо методу утилізації або регенерації доцільно враховувати не лише економічні показники, але й екологічні ризики, вимоги до безпеки та наявну інфраструктуру. Інтеграція регенерації в загальну систему поводження з нафтовими відходами дозволяє знизити витрати на нові сорбенти до 60% та зменшити екологічне навантаження на навколишнє середовище.

5.2 Техніко-економічне обґрунтування регенерації поліпропіленового сорбенту методом низькотемпературного нагрівання

Виконаємо розрахунок капітальних та поточних витрат для системи регенерації поліпропіленового нафтового сорбенту методом низькотемпературного нагрівання (до 350-400 °С), який дозволяє повертати сорбент до повторного використання до 3–4 разів.

Вихідні умови:

- тип сорбенту: поліпропіленовий рулонний;
- об'єм обробки: 1000 кг/місяць;
- метод регенерації: низькотемпературне нагрівання;
- кількість циклів повторного використання – 3;
- ціни наведено в доларах США.

Розрахунок капітальних інвестицій та поточних витрат наведено в табл. 5.2 і табл. 5.3.

Таблиця 5.2. Капітальні інвестиції

Стаття витрат	Вартість , долари США
Установка для термічного нагрівання	18000
Система конденсації парів нафтопродуктів	5000
Теплоізоляція, монтаж, пусконаладження	3500
Витяжна вентиляція, фільтри	4000
Складські ємності для відновлених та брудних мас	1200
Система пожежної безпеки	1000
Всього	32700

Таблиця 5.3. Поточні витрати (на місяць)

Стаття витрат	Значення	Сума, долари США/місяць)
Електроенергія (300 кВт·год/т)	300 кВт·год × \$0,12 × 1т	36,0
Обслуговування обладнання	5% від капітальних/рік	~136
Заробітна плата (1 оператор)	\$500 / міс	500
Витрати на фільтри / заміна	Оцінка	60
Амортизація обладнання (5 років)	32700 / 60 міс	545
Інші змінні витрати	Тара, транспортування	50
Разом		1327 / міс

Розрахунок економічної ефективності проводимо наступним чином:

Вартість нового поліпропіленового сорбенту $V_{п.с.} = 5,5$ долари/кг

Вартість регенерації (1 кг сорбенту):

$$V_{р.с.} = 1327 / 1000 \text{ кг} = 1,33 \text{ долари/кг}$$

Економія сорбентів на 1 кг або економічна ефективність:

$$E = 5,5 - 1,33 = 4,17 \text{ долари /кг}$$

Період окупності капітальних інвестицій буде дорівнювати:

$$T = 32700 / (4,17 \times 1000 \text{ кг}) = 7,8 \text{ місяців.}$$

Отже, регенерація поліпропіленового сорбенту за допомогою низькотемпературного нагрівання є економічно доцільною вже за 8 місяців експлуатації. З урахуванням 3-4 циклів повторного використання – витрати на сорбент зменшуються більш ніж у 4 рази. Цей метод особливо ефективний для стаціонарних або портових об'єктів із стабільними обсягами обробки.

РОЗДІЛ 6

ОХОРОНА ПРАЦІ

6.1 Загальні положення охорони праці

Охорона праці є невід'ємною складовою будь-якого виробничого процесу, забезпечуючи створення безпечних умов праці, збереження життя, здоров'я та працездатності працівників. У процесах, пов'язаних із застосуванням, регенерацією та утилізацією нафтових сорбентів, питання охорони праці відіграють особливо важливу роль через наявність небезпечних речовин, можливість контакту з нафтопродуктами та ризик виникнення пожежонебезпечних ситуацій.

Основною метою охорони праці є попередження виробничого травматизму, професійних захворювань та аварій шляхом реалізації комплексу організаційних, технічних та санітарно-гігієнічних заходів. Законодавчою основою для організації охорони праці в Україні є Закон України «Про охорону праці», а також нормативні акти, стандарти безпеки праці та галузеві інструкції.

Усі роботи, пов'язані з використанням нафтових сорбентів, організовуються відповідно до вимог безпеки та гігієни праці, з урахуванням таких ключових принципів:

1. Пріоритет життя і здоров'я працівника

Під час проведення робіт у зоні розливу нафтопродуктів або в умовах підвищеної небезпеки (робота з нагрівальними установками, спалювання, транспортування та збирання відпрацьованих сорбентів) необхідно мінімізувати всі ризики. Працівники забезпечуються ЗІЗ: захисними окулярами, фільтруючими респіраторами, термостійкими рукавицями, спецодягом.

2. Системний підхід до управління охороною праці

Організація робіт передбачає:

- наявність інструкцій з безпечного виконання робіт;
- систематичний контроль за станом обладнання;

- регулярні інструктажі та навчання персоналу;
- моніторинг умов праці та оперативне усунення небезпечних факторів.

3. Безпечна організація виробничого процесу

Усі технологічні процеси повинні проводитися відповідно до затверджених технологічних карт та інструкцій. Окрему увагу приділяють:

- безпечному поводженню з відпрацьованими сорбентами;
- попередженню проливів і займання;
- використанню тільки справного та сертифікованого обладнання;
- недопущенню сторонніх осіб у небезпечні зони.

4. Дотримання санітарно-гігієнічних норм

Робочі місця повинні відповідати вимогам щодо: рівня освітлення; температурного режиму; концентрації шкідливих речовин у повітрі; шумового навантаження тощо.

Працівники забезпечуються можливістю дотримання санітарних норм, включно з доступом до засобів гігієни, умовами для зберігання одягу, прийому їжі тощо.

5. Медичні огляди та контроль стану здоров'я

До робіт підвищеної небезпеки допускаються лише працівники, які пройшли відповідний медичний огляд і не мають протипоказань до роботи з хімічними речовинами або під впливом фізичних факторів.

Загальні положення охорони праці під час роботи з нафтовими сорбентами формують основу для створення безпечних умов праці, запобігання травматизму та покращення ефективності реагування на аварійні ситуації. Дотримання цих положень є обов'язковою умовою для функціонування підприємств, що виконують роботи з ліквідації наслідків розливів нафти, а також для усіх суб'єктів, які здійснюють утилізацію або регенерацію відпрацьованих сорбентів.

6.2 Аналіз небезпечних та шкідливих виробничих факторів

Під час виконання робіт, пов'язаних із застосуванням, збиранням, транспортуванням, регенерацією та утилізацією нафтових сорбентів, працівники можуть зазнавати впливу низки небезпечних та шкідливих виробничих факторів. Ці фактори можуть спричиняти погіршення стану здоров'я, підвищення ризику травматизму, виникнення професійних захворювань і аварій. Їх своєчасне виявлення, попередження та контроль є ключовим елементом забезпечення безпеки виробничого процесу.

Хімічні фактори

Під час роботи зі сорбентами, насиченими нафтою або її фракціями, можливий вплив: бензолу та його похідних; летких органічних сполук (ЛОС); поліциклічних ароматичних вуглеводнів (ПАВ); оксидів вуглецю.

Тривале вдихання цих речовин може призвести до подразнення дихальних шляхів, інтоксикації, запаморочення, головного болю, порушень центральної нервової системи.

Під час спалювання відпрацьованих сорбентів можливе утворення: чадного газу (CO), оксидів азоту (NO_x), хлористого водню (HCl), дрібнодисперсного пилу, діоксинів та фуранових сполук (особливо при спалюванні поліпропілену). Ці речовини є канцерогенними та вимагають застосування спеціальних систем очищення газів.

Фізичні фактори

Під час регенерації та термічної утилізації сорбентів можливий контакт з: нагрітими поверхнями; відкритим полум'ям; гарячими газами. Ризики включають опіки, ураження шкіри та тепловий стрес.

При роботі на відкритій місцевості в умовах аварій:

- можливе переохолодження;
- ризик падіння на слизьких поверхнях;
- погіршення видимості.

Під час використання сорбентів у вигляді матів, боїв, рулонів чи гранул може виникати ризик:

- порізів матеріалами із жорсткими краями;
- травм при підніманні мішків, контейнерів чи бочок;
- защемлень під час завантаження обладнання.

Застосування насосів, інсинераційних установок, транспортних стрічок, центрифуг може становити небезпеку у разі недотримання правил: затягування одягу, травмування кінцівок, ударів рухомими частинами.

Біологічні фактори

Хоча сорбенти не є біологічно небезпечними матеріалами, торф'яні та целюлозні сорбенти при зберіганні у вологих умовах можуть сприяти: розвитку грибків, утворенню спор та пилу. Це може викликати алергічні реакції, подразнення дихальних шляхів або дерматити.

Пожежо- та вибухонебезпечні фактори

Роботи з нафтовими сорбентами пов'язані з високою пожежною небезпекою через:

- легкозаймистість нафти та її фракцій,
- можливість займання сорбентів під час усмоктування ЛЗР,
- ризик вибуху парів у закритих ємностях.

Особливо небезпечними є:

- поліпропіленові сорбенти (горючі, виділяють чорний дим),
- торф'яні сорбенти (можуть тліти всередині шару),
- целюлозні сорбенти (можливість самозаймання при зберіганні у вологих умовах).

Психофізіологічні фактори

До цієї групи належать:

- висока напруга уваги при роботі в аварійних умовах,
- фізичне перевантаження,
- стресові ситуації при ліквідації розливів,
- монотонність робіт із сорбентами у великих обсягах.

Ці фактори можуть спричиняти втому, зниження концентрації та помилки персоналу.

Проведення робіт із нафтовими сорбентами вимагає комплексного підходу до управління ризиками. Усі небезпечні та шкідливі виробничі фактори повинні бути попередньо ідентифіковані, а для працівників – створені умови, які мінімізують можливість їхнього негативного впливу. Застосування засобів індивідуального захисту, належна організація робочого простору, вентиляція, системи пожежогасіння та регулярні інструктажі є основними елементами ефективної системи охорони праці при роботі з нафтовими сорбентами.

6.3 Ймовірність розливів нафти при аваріях суден

Визначення ймовірності розливів нафти відноситься до найбільш важких прогнозів. Це обумовлено різноманіттям факторів, що впливають на аварійність судів взагалі і на аварійність з розливами нафти зокрема. До таких факторів відносяться умови плавання, течії, погодні умови, навігаційні умови, особливості судна, помилки суднового екіпажу, зміни рівня води тощо.

Визначення ймовірності розливів ґрунтується на застосуванні математичних методів розрахунків теорії ризику, сучасної теорії статистики, теорії граничних розподілів для сум незалежних випадкових змінних тощо.

Для суден віком менше 15 років ймовірність аварій на 100 суднових років (1 раз в рік на 100 суден) складе в середньому $S_a = 3,48$ рази, у тому числі [29]:

- в прибережній зоні $S_a' = 2,48$ рази (включаючи порти і підхідні шляхи до них);

- у морі $S_a' = 1$ раз.

Ймовірні причини аварій:

- рух судна $S_a'' = 2,48$ рази:

- внутрішньо суднові $S_a'' = 1$ раз.

З урахуванням інформації про зниження аварійності, ймовірність аварій з розливами нафти на 100 суднових років для судів віком менше 15 років складе $S_{ap} = 0,56$ рази. Всі аварії слід очікувати в прибережній зоні (включаючи порти і

підхідні шляху до них). Оскільки для цілей цього розрахунку інтерес представляє ймовірність аварій тільки на акваторії порту, то для подальших розрахунків приймається зменшене в два рази значення $S_{ap1} = 0,28$ рази [29].

Якщо взяти середній час знаходження судна при кожному його заході до причалів філії рівним $t = 1,8$ діб, то тоді ймовірність аварійного розливу нафти для кожного заходження визначити за формулою:

$$S_{apcz} = S_{ap1} \cdot K_{cz},$$

де: S_{ap1} – ймовірність аварійного розливу нафти на 100 суднових років:

K_{cz} – коефіцієнт приведення, що дорівнює:

$$K_{cz} = 1,8 : (100 \cdot 365) = 0,000049.$$

Тоді ймовірність аварійних розливів на 100 суднових років, розрахована для суден, які будуть оброблятися через причали порту, для кожного їх заходження складе:

$$S_{apcz} = S_{ap1} \cdot K_{cz} = 0,28 \cdot 0,000049 = 0,0000138 \text{ розливу/с.з.}$$

Аварійні розливи з суден відбуваються при порушенні цілісності корпусу і в тому числі паливних танків, в результаті посадки на мілину, при зіткненні, вибуху, розломі корпусу тощо. Викид нафти при пошкодженні борту і днища розраховується за правилом 23 Додатка I до Міжнародної конвенції МАРПОЛ 73/78, з урахуванням конструктивних особливостей судна.

Наприклад, найбільший передбачуваний, але малоймовірний, обсяг розливу нафти при аварії з танкером становить $q_s = 400 \text{ м}^3$. У разі аварії з суховантажем з його паливних танків може вилити до 100 м^3 нафтопродукту [29].

6.4 Вимоги техніки безпеки при використанні сорбентів під час ліквідації розливів нафти і нафтопродуктів

Роботи із застосування сорбентів під час ліквідації аварійних розливів нафти та нафтопродуктів належать до категорії робіт підвищеної небезпеки. Вони пов'язані з ризиком займання, токсичним впливом нафтопродуктів,

фізичними навантаженнями та дією шкідливих виробничих чинників. Тому дотримання вимог техніки безпеки є необхідною умовою забезпечення безпечних умов праці персоналу та мінімізації негативних наслідків для навколишнього середовища.

Загальні вимоги безпеки

1. Роботи дозволяється виконувати лише навченому персоналу, який пройшов інструктаж з охорони праці та пожежної безпеки.

2. Кожен працівник повинен бути ознайомлений з характеристиками сорбенту, його особливостями взаємодії з нафтою, правилами поводження та утилізації.

3. Приміщення та відкриті майданчики, де проводяться роботи, мають бути обладнані засобами пожежогасіння, аварійними душами та аптечками першої допомоги.

4. Забороняється виконувати роботи у стані втоми, алкогольного або наркотичного сп'яніння.

Під час роботи з сорбентами працівники повинні використовувати:

- захисний спецодяг, стійкий до забруднення нафтопродуктами;
- хімічно стійкі рукавиці;
- захисні окуляри або захисний щиток;
- фільтруючий респіратор класу не нижче A1P1;
- водонепроникне взуття з протиковзною підошвою.

Рівень та вид засобів індивідуального захисту визначаються з урахуванням типу сорбенту, умов роботи та рівня небезпеки.

Безпечне використання сорбентів

1. На водній поверхні

Сорбуючі мати, бони та подушки розміщують з підвітряного боку, щоб запобігти їх неконтрольованому дрейфу.

Під час роботи на катерах або плавзасобах працівники зобов'язані використовувати рятувальні жилети.

Забороняється перебувати над розливом без нагляду або підтримки напарника.

На ґрунті або твердих поверхнях

Розсипні або гранульовані сорбенти слід розташовувати рівномірним шаром без надлишкового дозування.

Під час збору насичених сорбентів необхідно використовувати лопати, щітки, скребки та інший інструмент, що мінімізує контакт із руками.

Насичені нафтою сорбенти слід зберігати у герметичних контейнерах, позначених відповідно до вимог небезпечних відходів.

Заходи пожежної безпеки

1. Під час роботи строго забороняється застосування відкритого вогню, куріння та використання іскрових інструментів.

2. Поліпропіленові, торф'яні та целюлозні сорбенти, насичені нафтою, розглядаються як легкозаймисті матеріали — їх необхідно негайно видаляти із зони розливу.

3. Зони робіт мають бути обладнані вогнегасниками типів: ВВК (вуглекислотні), порошкові, пінні для нафтопродуктів класу В.

4. При зберіганні наповнених сорбентів необхідно уникати їхнього надмірного ущільнення та нагрівання.

Вимоги до транспортування та тимчасового зберігання

Насичені нафтою сорбенти транспортують у щільно закритих контейнерах із захистом від механічних ушкоджень.

Забороняється перевезення таких відходів разом з продуктами харчування, медикаментами або легкозаймистими речовинами.

Місця тимчасового зберігання мають бути розташовані поза будівлями, обладнані навісами та твердим покриттям.

Дії у разі аварійної ситуації

При розливі нафтопродуктів або загрозі займання слід негайно повідомити відповідальну особу та застосувати аварійний план реагування.

У разі потрапляння нафти або сорбенту на шкіру необхідно промити уражене місце великою кількістю води з милом.

При появі симптомів отруєння працівник повинен покинути небезпечну зону та звернутися за медичною допомогою.

Дотримання вимог техніки безпеки при роботі з нафтовими сорбентами є ключовим фактором зниження ризиків для здоров'я працівників, попередження аварій та пожеж, а також забезпечення ефективного й безпечного реагування на розливи нафти та нафтопродуктів. Виконання зазначених заходів забезпечує контрольоване використання сорбентів і сприяє впровадженню високих стандартів охорони праці на підприємствах.

ВИСНОВКИ

1. Проаналізовано екологічні наслідки розливів нафти у водних екосистемах, встановлено їх багатовекторний вплив на гідробіоценози, ґрунти, повітряне середовище та здоров'я людини. Обґрунтовано роль сорбентів у зниженні масштабу та тривалості негативних наслідків аварійних розливів.

2. Визначено ключові фактори, що впливають на ефективність сорбції, зокрема фізико-хімічні властивості нафти, температуру, хвильову активність, структуру та гідрофобні властивості сорбенту. Доведено, що вибір типу сорбенту має здійснюватися з урахуванням специфічних умов навколишнього середовища.

3. Розглянуто класифікацію нафтових сорбентів та визначено їх експлуатаційні характеристики. Встановлено, що поліпропіленові сорбенти мають найвищу нафтоємність і механічну стійкість, тоді як торф'яні та целюлозні вирізняються екологічністю та високою біорозкладністю.

4. Проведено комплексне дослідження екологічних характеристик, ефективності застосування та особливостей життєвого циклу трьох типів нафтових сорбентів – поліпропіленових, целюлозних (з деревної тирси) та сорбентів з модифікованого торфу – з метою визначення їх екологічної доцільності та оптимальності використання у процесах ліквідації розливів нафти та нафтопродуктів. У дослідженні застосовано методологію оцінки життєвого циклу (Life Cycle Assessment, LCA) відповідно до вимог міжнародних стандартів ISO 14040 та ISO 14044. На основі даних інвентаризації життєвого циклу кожного досліджуваного типу сорбенту виявлено, що найбільший екологічний тягар формує стадія виробництва поліпропіленового сорбенту через високі енергетичні витрати та використання невідновлюваних ресурсів.

5. Порівняльний аналіз впливів за категоріями (викиди CO₂, енергоспоживання, водоспоживання) показав, що: поліпропіленові сорбенти є найбільш ефективними у використанні, але мають найвищий екологічний слід;

торф'яні сорбенти мають збалансований профіль, помірні екологічні впливи та достатньо високу нафтоємність; целюлозні сорбенти є найбільш екологічно чистими, але поступаються ефективністю сорбції.

6. Визначено сучасні методи утилізації та регенерації відпрацьованих сорбентів. Встановлено, що термічна утилізація (спалювання) є економічно доцільною для великих обсягів, але супроводжується формуванням шкідливих викидів. Механічна регенерація є ефективною для поліпропіленових матеріалів, хоча обмежена кількістю циклів повторного використання. Для целюлозних і торф'яних сорбентів найбільш перспективними є біологічні методи утилізації.

7. Виявлено «гарячі точки» життєвого циклу сорбентів, серед яких: виробництво поліпропіленових матеріалів; спалювання відпрацьованих сорбентів; добування торфу, що супроводжується деградацією боліт. Для кожної з них запропоновано заходи мінімізації впливу, включно з переходом на екологічні модифікатори, використанням біосорбентів та удосконаленням технологій утилізації.

8. Надано економічну оцінку методів утилізації та регенерації. Доведено, що найбільш рентабельними є механічна регенерація та термічна утилізація, тоді як хімічна регенерація є затратною та малопрактичною.

Проведене дослідження підтвердило, що вибір сорбенту для ліквідації розливів нафти повинен ґрунтуватися не лише на його технічній і економічній ефективності, але й на повному екологічному профілі, включаючи вплив на довкілля протягом усього життєвого циклу. Найбільш екологічно доцільними виявилися целюлозні та торф'яні сорбенти, тоді як поліпропіленові залишаються найбільш ефективними з точки зору поглинальної здатності. Оптимізація життєвого циклу сорбентів можлива шляхом розвитку біоорієнтованих матеріалів, удосконалення методів утилізації та зниження екологічного навантаження виробничих процесів.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Бачерикова І.В., Гриненко С.Б., Кузнецова Л.С., Зажигалов В.О., Бачеріков О.В. Дослідження впливу природи матеріалів органічного походження на видалення нафти з поверхні води. *Каталіз та нафтохімія*. 2021. № 31. С. 75–83.
2. Біодеструктивний нафтопоглинаючий сорбент «Еколан-М». URL: <https://rema.dp.ua/ru/eco>
3. ЕКОНАД. Офіційний сайт. URL: <https://econadin.com/produkcziya/>.
4. Бондарець Ю. В., Матвєєва О.Л. Аналіз технологій ліквідації нафторозливів із застосуванням сорбентів на основі торфового моху роду *Sphagnum*. *Проблеми екологічної біотехнології*. 2013. № 1.
5. Вдосконалення технології ліквідації наслідків витоків нафтопродуктів під час перевезень/ Переста І.Я та ін. URL: <http://eadnurt.diit.edu.ua/bitstream/123456789/1514/1/503peres.pdf> Екологічні вимоги до транспорту в Європейському Союзі. URL: https://minjust.gov.ua/m/str_6957.
6. Глібовицька Н.І., Плаксій Л.В. Ефективність поглинання нафти сорбентами природного та штучного походження. *Науковий вісник НЛТУ України*. 2019. Т. 29, № 6. С. 76–78.
7. ДСТУ ISO 14040:2013. Екологічне управління. Оцінювання життєвого циклу. Принципи та структура. [Чинний від 2014-07-01]. Київ: Мінекономрозвитку України, 2014. 22 с.
8. Екологічні ризики: природа і критерії / Войціцький В.М., Хижняк С.В., Данчук В.В. та ін.. *Екологічні науки*. 2020. № 4(31). С. 131–135.
9. Закон України «Про перевезення небезпечних вантажів» № 1644-III від 06.04.2000. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1644-14#Text>.
10. Зубарев А.А., Літвак С.М., Літвак О.А. Прогнозування наслідків виливу (викиду) небезпечних хімічних речовин при аваріях на хімічно небезпечних об'єктах : методичні вказівки. Миколаїв : НУК імені адмірала Макарова, 2020. 56 с.

11. Інженерна екологія : підручник / В. М. Ісаєнко, К. О. Бабікова, Ю. М. Саталкін, М. С. Романов ; за заг. ред. д-ра біол. наук, проф. В. М. Ісаєнка. 2-е вид., актуалізоване на принципах сприяння сталому інноваційному розвитку та засадах синергетичного і компетентнісного підходів. Київ : НАУ, 2019. 452 с.
12. Калініченко Є.В., Томчаковський Г.Г., Колеснік О.В., Оберто Сантана Л.Е. Мінімізація ризиків забруднення морського середовища танкерним флотом: аналіз технічних і технологічних рішень. *Водний транспорт*. 2024. № 1(39). С.27–35.
13. Лесь А.В., Ращенко А.В., Смаглий В.О. Відповідальне споживання в умовах сталого розвитку. *Ефективна економіка*. 2019. № 1. URL: <http://www.economy.nayka.com.ua/?op=1&z=6832>.
14. Літвак О.А., Цівенков М.В. Технологічні та екологічні аспекти застосування методів утилізації та регенерації сорбентів нафти. *Проблеми екології та енергозбереження* : матеріали XVI Міжнародної науково-технічної конференції, м. Миколаїв 23-24 жовтня 2025 р. Миколаїв: НУК, 2025.
15. Літвак С.М., Літвак О.А. Аналіз властивостей сорбентів для ліквідації розливів нафти на водних об'єктах. *Інновації в суднобудування та океанотехніці*: матеріали XIV Міжнародної науково-технічної конференції, 20-21 вересня 2023 р. Миколаїв : НУК імені адмірала Макарова, 2023. С. 266–269.
16. Літвак С.М., Літвак О.А. Технічні засоби запобігання забрудненню довкілля при експлуатації суден. *Інновації в суднобудування та океанотехніці*: матеріали XI Міжнародної науково-технічної конференції, 24-25 вересня 2020 р. Миколаїв : НУК імені адмірала Макарова, 2020. С.6–10.
17. Маковецька Ю.М. Оцінка життєвого циклу продукції як інструмент впливу на мінімізацію відходів. *Ефективна економіка*. 2012. № 11. URL: <http://www.economy.nayka.com.ua/?op=1&z=1529>.

- 18.Малишевська О.С. Біотестування нафтових сорбентів на основі відходів полімерів. *Наукові доповіді НУБіП України*. 2021. № 3(91).
- 19.Малишевська О.С. Еколого-гігієнічна оцінка сорбентів із перероблених полімерних відходів. *Наукові доповіді НУБіП України*. 2020. № 4(86).
- 20.Мальований М.С. Очищення води від нафтопродуктів природними та модифікованими глинистими сорбентами. *Екологія довкілля та безпека життєдіяльності*. 2007. № 4. С. 61–65.
- 21.Матвєєва О.Л., Демянко Д.О., Огданська І.О. Аналіз проблем та перспектив використання методів очищення нафтовмісних стічних вод. *Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна*. 2012. Вип. 41. С. 181–186.
- 22.Міжнародна конвенція по запобіганню забрудненню з суден 1973 року (МАРПОЛ 73/78) (Редакція від 26.09.1997). URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/896_009#Text.
- 23.Наконечний І.В., Літвак О.А., Літвак С.М., Маринець О.М. Аналіз чинників, що впливають на процес біоремедіації ґрунтів, забруднених нафтопродуктами. *Екологічні науки*. 2023. № 4(49). С. 114–122.
- 24.Національна стратегія управління відходами в Україні до 2030 року. Розпорядження Кабінету Міністрів України від 08.11. 2017, № 820-р. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/820-2017-%D1%80#Text>.
- 25.Національна транспортна стратегія України на період до 2030 року. Розпорядженням Кабінету Міністрів України від 30 травня 2018 р. № 430-р. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/430-2018-p>.
- 26.На шляху зеленої модернізації економіки: модель сталого споживання та виробництва. Довідник у запитаннях та відповідях / С.В. Берзіна, Г.С. Бузан, В.М. Вакараш, Т.В. Князькова та ін. Київ: Державна екологічна академія післядипломної освіти та управління, 2017. 70 с.
- 27.Нормативи граничнодопустимих викидів забруднюючих речовин із стаціонарних джерел. Наказ Міністерства охорони навколишнього

середовища України 27.06.2006, № 309. URL:
<https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0912-06#Text>.

28. Охорона навколишнього середовища від забруднення нафтопродуктами: навч. посіб. / Шестопапов О. В., Бахарєва Г. Ю., Мамєдова О. О. та ін. Харків : НТУ «ХПІ», 2015. 116 с.
29. План локалізації та ліквідації аварій (катастроф) спеціалізованого морського порту Ольвія. Миколаїв, 2018. 100 с.
30. Правила запобігання забрудненню із суден внутрішніх водних шляхів України. Наказ Міністерства транспорту та зв'язку України № 694 від 13.08.2007. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z1167-07#Text>.
31. Природоохоронні технології. Частина 1. Захист атмосфери : навчальний посібник / Северин Л. І., Петрук В. Г., Безвозюк І. І., Васильківський І. В. Вінниця : ВНТУ, 2012. 388 с.
32. Ситар В.І., Бурмістр М.В., Кабат О.С. Промислова екологія при виробництві та переробці полімерних матеріалів. Дніпропетровськ : Вид-во ДВНЗ УДХТУ, 2012. 117 с.
33. Соловійов В.І., Губанов В.В., Кожанова Г.А., Гузенко Т.В. Сорбенти та біопрепарати для ліквідації нафтового забруднення моря. URL: <https://econadin.com/sorbenti-ta-biopreparati-dlya-likvidacziyi-naftovogo-zabrudnennya-morya/>.
34. Топільницький П.І. Фізико-хімічні та експлуатаційні властивості товарних нафтопродуктів. Львів: Видавництво: «Львівська політехніка», 2015. 248 с.
35. Хром'як У.В., Борщишин І.Д. Вторинне використання відходів полістирольних матеріалів. *Вісник Львівського державного університету безпеки життєдіяльності* : зб. на- ук. праць. 2012. № 6. С. 208–213.
36. Anwana E.E., Ewemoje O.E. Oil Sorption Performance of Sorbent Materials Examined Under Static and Dynamic Conditions. *European Journal of Engineering and Technology Research*. 2021. Vol. 6. Is. 5. P. 107–110.
37. Asif Z., Chen Z., An C., Dong J. Environmental Impacts and Challenges Associated with Oil Spills on Shorelines. *J. Mar. Sci. Eng.* 2022, № 10. 762.

38. Baniasadi M., Mousavi S.M. A Comprehensive Review on the Bioremediation of Oil Spills. In: Kumar V., Kumar M., Prasad R. (eds) *Microbial Action on Hydrocarbons*. Springer, Singapore, 2018. 267 p.
39. Baruque B., Corchado E., Mata A., Corchado J. M. A forecasting solution to the oil spill problem based on a hybrid intelligent system. *Information Sciences*. 2010. № 10 (180). Pp. 2029–2043.
40. Bovio E., Giorgio G., Prigione V., Spina F., Denaro R., Yakimov M. The culturable mycobiota of a Mediterranean marine site after an oil spill: isolation, identification and potential application in bioremediation. *Sci Total Environ*. 2017. V. 576:310–318.
41. Calcagnile P., Caputo I., Cannoletta D., Bettini S., Valli L., Demitri C. A Bio-Based Composite Material for Water Remediation from Oily Contaminants. *Mater. Des.* 2017. 134, 374–382.
42. Ecoinvent Database v3.9.1. URL: <https://support.ecoinvent.org/ecoinvent-version-3.9.1>.
43. Eco-profiles for determining environmental impacts of plastics. Plastics Europe. <https://plasticseurope.org/sustainability/circularity/life-cycle-thinking/eco-profiles-set/>.
44. European Platform on LCA. EPLCA. European Commission. URL: <https://eplca.jrc.ec.europa.eu>.
45. Gote M. G. , Dhila H. H. and Muley S. R. Advanced Synthetic and Bio-Based Sorbents for Oil Spill Clean-up: A Review of Novel Trends. *Nature Environment and Pollution Technology*. 2023. Vol. 22, No. 1. P. 39–61.
46. IMO. International Convention on Oil Pollution Preparedness, Response and Co-operation (OPRC). London: IMO, 1990.
47. IPCC Emission Factors Database (EFDB). URL: <https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/EFDB>.
48. ITOPF. Use of Sorbent Materials in Oil Spill Response. Technical information paper № 9. London: The International Tanker Owners Pollution Federation Limited. 2012. 12 p.

49. Life Cycle Assessment Solutions for Packaging. URL: <https://sphera.com/resources/brochure/lca-for-packaging/>.
50. Life Cycle Assessment. EEA UNEP Glossary <http://www.uneptie.org/pc/pc/tools/lca.htm>.
51. Life cycle initiative: official website. <https://www.lifecycleinitiative.org/>.
52. Litvak O. Formation of sustainable development indicators complex in integrated control system of Black Sea region's coastal zone. *Trends of development modern science and practice* : The IX International Science Conference. November 16 – 19, 2021, Stockholm, Sweden. P. 124–126.
53. McDonagh M., Abbott J., Swannell R., Gundlach E. Handling and disposal of oily waste from oil spills at sea. International Oil Spill Conference Proceedings, February 1995.
54. Mapelli F., Scoma A., Michoud G., Aulenta F., Boon N., Borin S., Kalogerakis N., Daffonchio D. Biotechnologies for marine oil spill cleanup: indissoluble ties with microorganisms. *Trends Biotechnol.* 2017. V. 35(9):860–870.
55. Michel J., Fingas M. Oil Spills: Causes, Consequences, Prevention, and Countermeasures *Fossil Fuels: Current Status and Future Directions*. Singapore: WSPC, 2016. P. 159–201.
56. Paulauskiene T., Uebe J., Ziogas M. Cellulose Aerogel Composites as Oil Sorbents and Their Regeneration. *PeerJ*. 2021. № 9. e11795.
57. Pintor A., Ferreira C., Pereira J., Souza R., Silva S., Vilar V., Botelho C., Boaventura R. Oil desorption and recovery from cork sorbents. *Journal of Environmental Chemical Engineering*. 2015 Vol.3. Is.4, Part A. 2917–2923.
58. Plastics Europe. URL: <https://plasticseurope.org/knowledge-hub/>
59. REN Hong-xiang, JIN Yi-cheng, YIN Yong. 3D Visualization of Oil Spill in Marine Simulator *Journal of System Simulation*. 2009. № 1.
60. Saleem J., Zubair Khalid Baig M., Rana S., Gordon M. Sustainable Solution for Plastic Pollution: Upcycling Waste Polypropylene Masks for Effective Oil-Spill Management. *International Journal of Molecular Sciences*. 2023. № 24(15). 12368.

61. Sharivker V., Volchek K., Blinov V., Yao Y., Fieldhouse B., Lambert P., Brown C.E. Treatment and Disposal of Oily Waste Generated in Spill Cleanup Operations. 2019. URL: <https://www.linkedin.com/pulse/treatment-disposal-oily-waste-generated-spill-cleanup-sharivker/>.
62. Teas C., Kalligeros S., Zaniokos F., Stournas S., Lois E., Anastopoulos G. Investigation of the effectiveness of absorbent materials in oil spills clean up. *Desalination*. 2001. 140. P. 259–264.
63. Tomkowiak K., Mazela B., Szubert Z., Perdoch W. Hydrophobic Cellulose-Based Sorbents for Oil/Water Separation. *Molecules*. 2024. № 29, 4661.
64. Trinh T.N., Nguyen D.L., Thai V.N. Modified methods of oil cleanup with cellulose-based adsorbents: a review. *VN J. Hydrometeorol.* 2023. № 14. P. 96–120.
65. Wang Y., Yang H., Chen Z. et al. Recyclable Oil-Absorption Foams via Secondary Phase Separation. *ACS Sustainable Chem. Eng.* 2018. № 6, P. 13834-13843.
66. Zamparas M., Tzivras D., Dracopoulos V., Ioannides T. Application of Sorbents for Oil Spill Cleanup Focusing on Natural-Based Modified Materials: A Review. [*Molecules*](#). 2020. № 25(19). 4522.
67. Zaro M., Silvestre W.P., Fedrigo J.G., Zeni M., Baldasso C. Sorption of oils by a commercial non-woven polypropylene sorbent. *Research, Society and Development*. 2021. Vol. 10, n. 14, e554101422671.
68. Zhenliang Liaoa, Phillip M. Hannamb, Xiaowei Xia, Tingting Zhao. Integration of multi-technology on oil spill emergency preparedness. *Marine Pollution Bulletin*. 2012. № 10 (64)– Pp. 2117–2128.
69. Zhu Y., Ge X., Li Y., Hou W. , Ma J. , Li H. Life Cycle Assessment of Different Sorbents at Early Stage. *Pol. J. Environ. Stud.* 2022. Vol. 31, №. 3. 2973-2986.

Таблиця А.1. Характеристика сорбентів нафти, що використовуються на водній поверхні, за типами форми

Форма	Характеристика
Плаваючі сипучі сорбенти	Не мають властиву форму, складені з не пов'язаних між собою частинок. Найбільш доступні у продажу. Це порошки, гранули або короткі мінеральні волокна (оброблені матеріали: перлітові глини, вермикуліт, графіт), рослинного (оброблені чи необроблені матеріали: тирса, торф, рисова, гречана лушпиння та ін.) походження або синтетичний матеріал (полімер епоксид). Насправді для збору певного обсягу нафти потрібно щонайменше такий самий обсяг сорбенту. Це з тим, що сипучі сорбенти, які мають високої масової нафто ємністю, мають низьку насипну щільність. Сипучі сорбенти можуть бути нанесені різними способами: • вручну (спосіб не дає рівного розподілу сорбенту та застосовується тільки при розливах невеликої площі в доступних місцях); • з використанням гідравлічного розпилювача (спосіб дозволяє наносити сорбенти на значні відстані, в той же час не може бути застосований для ряду сорбентів з низькою гідрофобністю внаслідок того, що речовина, що розпилюється, повністю контактує з водою при нанесенні. При такому способі розпилення в першу чергу знижуються нафто ємність і плавучість сорбентів; • з використанням пневматичних розпилювачів (спосіб застосовується практично для всіх сорбентів, що найменше впливає на властивості сорбентів, проте має обмежений радіус дії). У всіх випадках чутливість до вітру сипких сорбентів потребує наявності у персоналу під час роботи спецодягу, захисних масок та окулярів. Після сорбування нафти виходять більш менш щільні конгломерати, властивості яких залежать від природи сорбентів, типу нафти, площі і стану водної поверхні. Для збору мережею необхідно, щоб розмір осередків був меншим від середнього розміру частинок сорбенту.
Серветки, листи	Гнучкі пластини малої товщини (3см); основні розміри ширини та довжини значно перевищують товщину (як мінімум у 10 разів), при цьому листи мають бути досить міцними.
Рулони	Пакування довжиною до кількох десятків метрів. Зазвичай виконуються із нетканих матеріалів. Характеризуються не великою вагою, що полегшує встановлення та ручний збір. Особливо ефективні для збирання нафти низької та середньої в'язкості. Можуть просочуватися вогнестійкими складами та використовуватися як бонові загородження (у тому числі вогнестійкі). З іншого боку, сорбційні характеристики різко знижуються з підвищенням в'язкості нафтопродуктів, що збираються.

Форма	Характеристика
Подушки	Гнучка упаковка, де сорбуючий матеріал міститься в проникному матеріалі, досить міцному для того, щоб його можна було застосовувати в жорстких умовах.
Сорбуючі бонові загородження	Гнучка упаковка, де сорбуючий матеріал міститься в проникному матеріалі, досить міцному для того, щоб застосовувати в досить жорстких умовах.
Мотузки та троси	Гнучкі сорбуючі продукти з ниткоподібних матеріалів, сплечених у мотузки та троси, здатні захоплювати в'язкі рідини. Ці матеріали досить обмеженого застосування, використовуються вручну як трос-швабри для збору в'язких та високов'язких нафтопродуктів.
Спеціальні продукти	Усі продукти, що адсорбують, які не належать до категорій, перелічених вище