

Scientific and technical journal «Technogenic and Ecological Safety»

RESEARCH ARTICLE
OPEN ACCESS

УДК [502.174:54-414]:621.315.615

ОПТИМІЗАЦІЯ ВИБОРУ ВІТЧИЗНЯНИХ СОРБЕНТІВ ДЛЯ ЛІКВІДАЦІЇ НАСЛІДКІВ РОЗЛИВІВ ТРАНСФОРМАТОРНИХ ОЛИВ ВНАСЛІДОК РУЙНУВАННЯ ОБ'ЄКТІВ ЕНЕРГЕТИЧНОГО КОМПЛЕКСУ

Л. Б. Яшук

кандидат хімічних наук, доцент

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8975-851X>Черкаський державний технологічний університет
б-р Шевченка, 460, м. Черкаси, 18006, Україна**І. Г. Маладика**

кандидат технічних наук, доцент

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8784-2814>Черкаський державний технологічний університет
б-р Шевченка, 460, м. Черкаси, 18006, УкраїнаDOI: <https://doi.org/10.52363/2522-1892.2026.1.6>

Отримано: 4 травня 2026

Прийнято: 29 травня 2026

Опубліковано: 30 травня 2026

Цитувати як: Яшук Л. Б., Маладика І. Г. Оптимізація вибору вітчизняних сорбентів для ліквідації наслідків розливів трансформаторних олиव внаслідок руйнування об'єктів енергетичного комплексу. *Техногенно-екологічна безпека*. 2026. Вип. 19(1/2026). С. 45–52.
DOI: <https://doi.org/10.52363/2522-1892.2026.1.6>

Ліцензія відкритого доступу: Creative Commons Attribution 4.0 International License

Анотація. Особливістю війни впродовж 2024–2026 років є скоординована військова кампанія ворога на руйнування електроенергетичної сфери України. Українські електропідстанції, особливо радянського періоду будівництва, обладнані трансформаторами, що заповнені трансформаторними оливами з високим вмістом ПХБ. Ураження таких підстанцій спричиняє виливи трансформаторних олив у довкілля. Для ліквідації осередків виливів нафтопродуктів використовують сорбенти штучного та органічного походження. В роботі проаналізовано фізико-хімічні властивості 5 сорбентів: нафтоємність, гідрофобність, швидкість дії. При оцінці економічної ефективності сорбентів трансформаторної оливи враховувалась їх насипна густина (об'ємна вага), вартість у вітчизняній торгівельній мережі, заявлена виробниками сорбційну ємність. Для оцінки ефективності вибраних сорбентів використовувався гравіметричний та розрахунковий методи. В роботі також проведено порівняльний аналіз сорбційної ємності досліджуваних зразків сорбентів трансформаторної оливи. Експерименти проведено в лабораторних умовах взимку (температура повітря +15°C), та навесні (+25°C) 2024–2025 років. В якості нафтопродукту використано трансформаторну оливу марки Т-1500 (ДСТУ 4452:2005). Необхідною умовою під час вибору зразків сорбентів було їх виробництво вітчизняними виробниками в Україні.

За результатами проведених досліджень та розрахунків найбільш перспективним для ліквідації розливів трансформаторних олив є Термографеніт Е. Недоліками біосорбентів Еконадіну та Еколану М є: висока вартість, обмеженість сорбційних властивостей при низьких температурах, повільність дії. Низька вартість деревної тирси робить її привабливим сорбентом для власників енергоустановок, але складнощі із збором відпрацьованої тирси та проблема подальшої її утилізації обмежують вибір. Практична цінність дослідження полягає у оптимізації вибору вітчизняних сорбентів для ліквідації наслідків розливів трансформаторних олив із врахуванням їх переваг та недоліків.

Ключові слова: сорбент, нафтоємність, гідрофобність, швидкість сорбції, температура, плавучість, біосорбент, карбонізація.

Постановка проблеми

Російсько-українська війна призвела до значних негативних змін в довкіллі. Ракетні удари по об'єктах електроенергетики спричинили численні техногенні катастрофи, забруднення водних та ґрунтових ресурсів, руйнування природних екосистем. За розрахунками Міністерства економіки, довкілля та сільського господарства на кінець 2024 року загальний обсяг лише забруднених водних об'єктів становив 2,4 тис. т. [1]. Масштабність наслідків матиме тривалий ефект на якість життя та біорізноманіття в Україні.

Особливістю війни впродовж 2024–2026 років є масовані атаки на об'єкти енергетичної інфраструктури України. Пошкодження або руйнування об'єктів системи енергозабезпечення

сталися щонайменше в Одеській, Івано-Франківській, Львівській, Вінницькій, Дніпропетровській, Хмельницькій, Кіровоградській областях, передачі електроенергії у 17 регіонах. Багато енергетичних об'єктів зазнали численних атак, і деякі з них були зруйновані повністю [2].

Українські електропідстанції, особливо радянського періоду будівництва, обладнані трансформаторами, що були заповнені трансформаторними оливами з високим вмістом поліхлорованих біфенілів (ПХБ). Ураження таких підстанцій призвело не тільки до фізичного руйнування обладнання, але й до виливів трансформаторних олив у ґрунти, сніг, поступове проникнення їх з опадами у підземні поверхневі води. Кожна уражена підстанція є локальною

екологічною катастрофою, оскільки ПХБ мають тривалий термін розкладання і накопичуються в навколишньому середовищі, створюючи серйозні загрози для здоров'я людини та довкілля.

Для боротьби з подібним забрудненням водних ресурсів та ґрунтів використовують хімічні або органічні сорбенти. Вибір ефективних сорбентів повинен поєднувати аналіз сорбційних властивостей, вартості, шляхів утилізації та інших фізико-хімічних показників поглинаючих речовин. Цілеспрямована руйнація ворогом трансформаторів на підстанціях потребує уваги та дій для нейтралізації негативного впливу на довкілля.

Для ліквідації осередків забруднення довкілля нафтопродуктами у світі використовується понад 200 видів сорбентів. Всі вони мають різні фізико-хімічні властивості, дисперсність, призначення, шляхи утилізації, що ускладнює їх вибір. Практичний досвід показує, що при видаленні тонких шарів нафтопродуктів з водної поверхні чи ґрунтів рекламні відмінності між сорбентами несуттєві і при їх закупівлі необхідно зважати на вартість, насипну густину, зручність застосування та подальшу утилізацію використаних абсорбентів.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Ще до початку військових дій широке застосування на вітчизняних промислових об'єктах різноманітних нафтомісних сполук (палив, індустриальних масел, мастил, емульсій, розчинників) призвело до того, що стічні води в значній мірі були забруднені нафтовими сполуками. Забруднення поверхневих водних об'єктів нафтопродуктами у складі стічних вод в Україні у 2020 році сягало 246,6 т [3].

В енергооб'єктах джерелом забруднення довкілля нафтомісними сполуками є трансформатори. Існує кілька різновидів трансформаторів, що використовуються у вітчизняній енергетиці. Значна частка з них припадає на масляні, які використовують трансформаторні оливи для охолодження та ізоляції. Нафтопереробна промисловість випускає декілька сортів трансформаторних оливи. Вони різняться за сировиною та способом отримання. Ідеальними компонентами трансформаторної оливи з мінеральною основою є ізопарафіни, циклоалкани і невелика кількість моноциклічних ароматичних вуглеводнів [4]. Основними перевагами мінеральних оливи є їх низька вартість, тривала історія використання і популярність серед користувачів. Разом з тим, використання трансформаторної мінеральної оливи провокує появу значних екологічних проблем: вона важко піддається біологічному розкладанню, і забруднює навколишнє середовище у разі витіку на тривалий час [5].

Аналіз вітчизняної нормативної бази показав, що в Україні для обмеження розтікання масла під час аварійного пошкодження маслоснаповнених силових трансформаторів передбачено облаштування маслосприймачів з відведенням масла масловідводами в маслосбірник [6]. Через ракетні удари по трансформаторних підстанціях

контрольоване збирання охолоджуючих оливи часто стає неможливим. Гасіння пожеж в місцях прильотів, танення снігу та опади призводять до локального забруднення ґрунтового покриву та утворення стічних вод з високим вмістом нафтопродуктів. Через низьку густину трансформаторних оливи та швидке проникнення у ґрунти та воду, ліквідація їх розливів потребує використання сорбентів.

Якість сорбентів визначають ряд параметрів: ємність поглинання нафтопродуктів, ступінь гідрофобності, плавучість після сорбції нафти чи нафтопродуктів, можливість десорбції, регенерації або утилізації [7,8]. Органічні та органо-мінеральні сорбенти є більш перспективними для ліквідації наслідків обмежених розливів нафтопродуктів через менші витрати, високу ефективність, можливість повторного використання, біологічне розкладання та відновлення [9,10]. Ряд авторів вказують на перспективи використання в якості органічних сорбентів модифікованого торфу, деревної тріски і тирси, висушених зернових продуктів, макулатури та інше [11,12]. Останнім часом популярності набирають біосорбенти, що поєднують у своєму складі неорганічну основу та нафтоокислювальні бактерії. Зокрема, розроблені вітчизняними науковцями, біосорбенти Еколан-М, Еконадін локалізують нафтові забруднення з руйнуванням адсорбованих нафтопродуктів біологічним методом, за допомогою нафтоокислювальних мікроорганізмів [13]. На відміну від інших засобів, біосорбенти не збирають після використання. Через деякий час після сорбції нафтопродуктів препарати опускаються на дно і розкладання нафтових вуглеводнів, локалізованих на біосорбентах, відбувається безпосередньо у водному середовищі [14].

Постановка завдання та його вирішення

Метою роботи є комплексна оцінка природних сорбентів та біосорбентів вітчизняного виробництва для нейтралізації наслідків розливу трансформаторних оливи після руйнації енергооб'єктів внаслідок військових дій.

Наукова новизна досліджень полягає в оцінці оптимальних сорбентів, що можуть використовуватись при ліквідації виливів нафтопродуктів, зокрема трансформаторних оливи, внаслідок ракетних ударів. В дослідженні зроблено акцент на характеристиці фізико-хімічних показників різних класів сорбентів (органічного та неорганічного походження), які у поєднанні з економічною складовою, обмежують перспективу їх використання в умовах воєнного ураження енергооб'єктів.

Матеріали та методи досліджень

Для вибору оптимальних сорбентів вітчизняних виробників при ліквідації наслідків розливів трансформаторних оливи внаслідок військових атак, досліджували сорбенти різного складу: органічні, штучні та біосорбенти. Необхідною умовою під час вибору зразків сорбентів було їх виробництво вітчизняними виробниками в Україні.

В якості органічного сорбенту обрали соснову тирсу, яка має найкращі показники абсорбції нафтопродуктів серед усіх різновидів тирси, а також є досить поширеним матеріалом на деревообробних підприємствах [15]. Карбонізація тирси сприяє збільшенню сорбційної ємності вуглецевих сорбентів [16], тому для аналізу було обрано целюлозний сорбент, який виробляється на підприємстві «Ековата» (м. Буча Київської області) і призначений для збору нафтопродуктів.

Біосорбенти почали використовуватися як екологічно безпечна альтернатива синтетичним сорбентам для ліквідації плям нафти, очищення стічних вод та ґрунтів з 80-х років минулого століття. Особливістю їх складу є поєднання неорганічної основи та іммобілізованих мікробіологічних культур. Суттєвим недоліком застосування біосорбентів є вимогливість до температури довкілля, в зимових умовах без спеціального підігріву вони не використовуються. Для дослідження було обрано 2 біосорбенти: Еконадін та Еколан М вітчизняних виробників.

Серед сорбентів мінерального складу було проаналізовано властивості Термографеніту Е (ТУ У 26.8-30969031-013-2007). Єдиним вітчизняним виробником цього сорбенту нафтопродуктів є ТОВ «ТМСпецмаш».

Під час дослідження був проведений аналіз обраних сорбентів на основі характеристик, заявлених їх виробниками. Експериментально визначені показники: насипної густини, нафтоємності, гідрофобності, плавучості, швидкості поглинання трансформаторної оливи. В роботі були використані гравіметричний, статичний, розрахунковий методи. Дослідження проводили взимку, при температурі приміщення +15 °С, та навесні (+25 °С). Економічну доцільність використання сорбенту визначали за співвідношенням ефективності використання/фінансові витрати. В якості нафтопродукту використовували трансформаторну оливу марки Т-1500 (ДСТУ 4452:2005).

Сорбційну ємність матеріалів визначали використовуючи скляний посуд ($d=30$ см), в який наливали 1,5 л води та 100 мл трансформаторної оливи. Попередньо зважене металеве сито з відомою кількістю сорбенту занурювали у посуд з нафтопродуктом. Сито з сорбентом виймали через 30 хвилин, давали стекти надлишковій трансформаторній оливі (1–5 хв) і зважували. Сорбуючі матеріали мали однакову масу у всіх пробах (5 г).

Нафтоємність визначали як відношення поглинутої маси нафти до маси сухого сорбенту і розраховували за формулою:

$$HE = \frac{m_2 - m_1 - m_c}{m_c}, \quad (1)$$

де: HE – нафтоємність, г нафти/г сорбента; m_2 – загальна маса сита, сорбенту і поглинутої нафти, г; m_1 – маса сита, г; m_c – маса наважки сорбента, г.

Усі вимірювання проводили у чотирикратній повторюваності, з подальшим усередненням даних.

Визначення плавучості сорбентів проводили за формулою:

$$B = \left(1 - \frac{M_s \cdot (1+E)}{V_s \cdot \rho_{\omega}}\right) \cdot 100\%, \quad (2)$$

де: M_s – маса сухого сорбенту, г; V_s – об'єм, який займає сорбент у воді, см³; E – нафтоємність сорбенту, г/г; ρ_{ω} – густина води, г/см³.

Плавучість визначали протягом тижня, щодня визначаючи відсоток плаваючого на поверхні модельного розчину нафтосорбенту.

Економічну доцільність використання обраних сорбентів визначали розрахунком вартості сорбенту, необхідного для ліквідації 1 тонни трансформаторної оливи. Аналіз цінних пропозицій на вітчизняному ринку сорбційних матеріалів проводився із використанням актуальних даних відкритих джерел та репрезентативних торговельних майданчиків України.

Результати та їх обговорення

Оцінка перспектив використання органічних сорбентів рослинного походження для ліквідації розливів нафтопродуктів проводилась багатьма науковцями [17,18]. Як правило, досліджуються вуглецеві сорбенти, сировиною для отримання яких є деревна тирса, солома, шрот, очерет, та ін. Існують наукові розробки сорбентів на рослинній основі – торф, целюлоза, деревне вугілля, шишки хвойних дерев та хвоя [19].

Перевагами соснової тирси як сорбента нафтопродуктів є висока сорбційна ємність, доступність, та низька вартість. Разом з тим, тирса має низькі гідрофобні властивості, швидко вбирає воду і її здатність поглинати нафтопродукти значно погіршується. Збір використаної тирси в умовах локального нафтового вогнища вимагає додаткових зусиль через її легкість.

Для покращення сорбційних властивостей деревну тирсу, як правило, модифікують [20]. Прикладом модифікованої тирси є целюлозний сорбент. В Україні він отримується внаслідок різних технологічних процесів (модифікації необробленої соснової тирси, отримання гідрофобних волокон, кислотного гідролізу). Перевагами целюлозного сорбенту є його універсальність (ефективно працює як з поверхні ґрунту, так і на поверхні водоєм), швидкість поглинання нафтопродуктів протягом 30-60 секунд, висока гідрофобність. Недоліками є необхідність збирання целюлозного сорбенту механічним шляхом та подальша утилізація.

За складом біосорбент Еколан М є продуктом піролізу деревини та актинобактерій. Нафтоокислювальні бактерії у його складі здатні до синтезу поверхневоактивних речовин, які виявляють властивості емульгації, що дає їм змогу здійснювати деструкцію як розчинних, так і нерозчинних компонентів нафти. Головною перевагою Еколану М за характеристикою виробника є біодеградація

сорбованого нафтопродукту з поступовим перетворенням у гумус. Біосорбент Еконадін.

У складі «Еконадину» (ТУ У 30171732-001-2000 Препарат бактеріальний «Еконадін», реєстрація в Держстандарті 11.09.2000, № 095/004466) нафтоокислювальні бактерії іммобілізовані на торфі. Цей біосорбент виробники пропонують для довгострокового очищення ґрунту, забрудненого нафтопродуктами. Потребує приготування робочого розчину на основі його сухої фракції.

Термографеніт Е є розробкою Українського науково-дослідного центру інституту цивільного захисту ДСНС України. Основою цього біосорбенту є терморозширений графіт, призначений для збору нафти та нафтопродуктів. В його характеристиці відмічено надвисоку сорбційну ємність і надзвичайно високу плавучість. Виробники вважають сорбент на основі терморозширеного графіту значно кращим у порівнянні із світовими аналогами за рахунок високої нафтоємності і гідрофобності.

Одним з ключових показників для вибору сорбентів при розливах нафтопродуктів є їх нафтоємність. Ємність поглинання (за масою) значною мірою залежить від в'язкості нафтопродукту. Високов'язкі нафтопродукти (мазут, густі оливи) вимагають сорбентів з великими порами, тоді як легкі (бензин, гас) краще поглинаються дрібнопористими матеріалами. Залежність між в'язкістю нафтопродукту та сорбентом відноситься до основних факторів, що визначають ефективність очищення від розливів. Вітчизняних довідників з порівняльними характеристиками сорбентів в Україні немає, а більшість виробників вказують нафтоємність сорбентів, виміряну на сирій нафті, без урахування різновидів нафтопродуктів. Особливістю трансформаторних олив є низька в'язкість навіть при низьких температурах (до -45°C), що необхідно для ефективної циркуляції під час охолодження трансформаторів та їх ізоляції (таблиця 1).

Таблиця 1 – Порівняльна таблиця в'язкості нафтопродуктів

Нафтопродукт	Кінетична в'язкість (мм ² /с)	Характеристика
Високопарафініста нафта Решетняківського родовища	21,7	В'язка
Бензин автомобільний	0,5–0,8	Дуже рідкий
Дизельне паливо (літнє)	2,0–4,5	Рідке
Дизельне паливо (зимове)	1,5–3,0	Рідке для низьких температур
Трансформаторна олива (Т-1500)	8,0–9,0	Середня в'язкість
Індустріальна олива	20,0–40,0	В'язка
Моторна олива	90,0–110,0	Підвищена в'язкість

Середня в'язкість трансформаторних олив потребує пошуку таких сорбентів, які б поєднували

високу швидкість поглинання з надійною фіксацією рідини.

Переваги та недоліки сорбентів нафтопродуктів при первинному аналізі часто визначаються на основі їх насипної густини, оскільки вона визначає об'єм та вагу продукту, і як наслідок, засоби та шляхи транспортування до осередків розливів. Порівняльний аналіз насипної щільності досліджуваних сорбентів (рисунок 1) показує відносно більші об'єми біосорбентів відносно інших зразків. Найменша насипна густина Термографеніту Е свідчить про його високу пористість та сорбційну ємність, але одночасно надає сорбенту значну леткість.

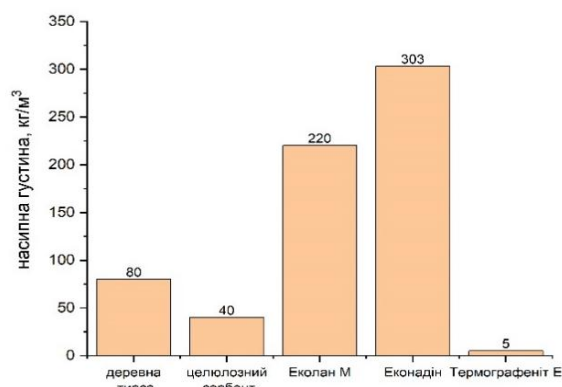


Рисунок 1 – Насипна густина досліджуваних сорбентів нафтопродуктів, кг/м³

Висока леткість Термографеніту Е загрожує швидким його видунням з поверхні осередку розливу нафтопродуктів при наявності вітру, і потребуватиме надлишкової маси сорбенту під час використання. Насипна густина досліджуваних біосорбентів вище у порівнянні з іншими. Це знижує витрати на логістику, але одночасно при ліквідації розливів нафтопродуктів у воді призводить до їх занурення із поглинутим забруднювачем.

За сорбційними властивостями отримані результати по досліджуваним зразкам сорбентів відповідали вказаним виробниками, хоча маса поглинутої трансформаторної оливи була нижчою (рисунок 2).

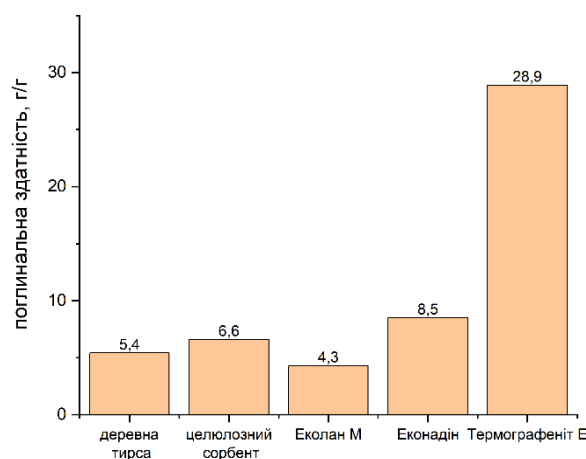


Рисунок 2 – Поглинальна здатність сорбентів до трансформаторної оливи, г/г

Сорбційні властивості зразків сорбентів оцінювали по їх гідрофобності/олеофільності та плавучості. Плавучість сорбенту полегшує збір із водної поверхні нафти і нафтопродуктів, що сприяє тому, що він тримається на поверхні тривалий час і не викликає вторинне забруднення.

Серед досліджених природних сорбентів найкращу плавучість має Термографеніт Е (99 %), «Еконадін» (91 %), Еколан М (90 %). Порівняно з ними тирса і целюлозний сорбент мають нижчу плавучість – 78 % і 82 % відповідно.

Тирса і целюлозний сорбент мають високу водоемність (6,62 г/г і 4,57 г/г відповідно) порівняно з іншими дослідженими сорбентами. Тирса – органічний сорбент, який характеризується поглинанням води разом із нафтопродуктами, через що швидко насичується водою і тоне. Целюлозний сорбент нафтопродуктів отримується силанізацією целюлози на стадії виробництва, що підвищує її гідрофобність. Модифікована целюлоза володіє високою вибірковою до нафтопродуктів та підвищеною гідрофобністю у порівнянні із необробленою деревною тирсою, але поступається біосорбентам. Еколан М і Еконадін (1,72 і 1,46) мають нижчу водоемність, незважаючи на те, що їх базовою основою є торф та солома. Водоемність Термографеніту Е є незначною (рисунок 3).

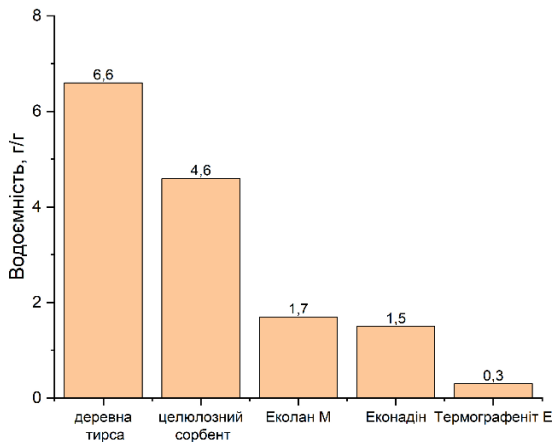


Рисунок 3– Водоемність досліджуваних сорбентів, г/г

Показник гідрофобності у досліджуваних сорбентів в цілому відповідає характеристикам, заявленим виробниками, але в меншій мірі. Так, Еконадін та Еколан М поглинають з поверхні води приблизно однакову кількість трансформаторної оливи (3,2 г та 3,5 г), тоді як целюлозний сорбент і тирса – 2,33 г і 1,58 г відповідно (рисунок 4). Найкращі показники у Термографеніту Е – 5 г. Утримання нафтопродукту целюлозними сорбентами коливається на рівні 40 %,

біосорбентами на рівні 60 %, Термографеніту Е в межах 75–85 %.

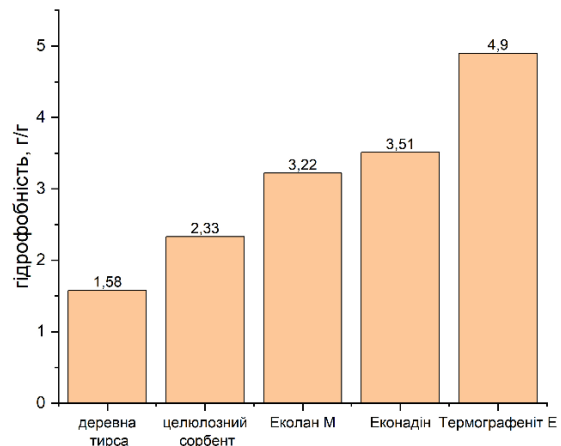


Рисунок 4 – Показники гідрофобності досліджуваних сорбентів, г/г

Різницю в здатності утримувати нафтопродукти сорбентами досліджуваних зразків можна пояснити механізмами поглинання нафтопродуктів. Тирса – прекрасний сорбент – поглинає та відмінно утримує нафтопродукти, при цьому її об'єм збільшується внаслідок набухання. Целюлозний сорбент – за рахунок великої зовнішньої поверхні частинок модифікованої целюлози частково є абсорбентом, хоча основний механізм – це адсорбція. Біосорбенти (Еколан М та Еконадін) по суті поєднують абсорбційні та адсорбційні властивості. За рахунок базової основи (сфагнового торфу чи продуктів піролізу деревини) вони вбирають, а мікроорганізми в їх структурі адсорбують на своїй клітинній стінці нафтопродукти і руйнують органічні молекули. Термографеніт Е за механізмом поглинання є відмінним адсорбентом, тому його об'єм не збільшується.

На ефективність сорбції також впливає температура середовища. На жаль, пік ворожих прильотів по об'єктах енергетики припадає традиційно на зимовий час. Метою такої сезонності нападів є провокування окрім військових наслідків ще й гуманітарної катастрофи для українців. Сорбція трансформаторної оливи целюлозними сорбентами взимку при аварійних виливах зменшується приблизно в 1,5–3 рази (або на 30–60 %) порівняно з ефективністю при кімнатній температурі [21]. Ефективність дії біосорбентів найвища в інтервалі +25 °С ... +30 °С, що пов'язано із активністю нафтоокислювальних бактерій в їх складі [22]. Процес сорбції для всіх досліджуваних зразків уповільнювався при температурі +15 °С. Незважаючи на зниження швидкості поглинання, Термографеніт Е при низькій температурі зберігає високу сорбційну ємність (таблиця 2).

Таблиця 2 – Залежність кількості поглинутої трансформаторної оливи від температури, %

Сорбент	Час взаємодії, хв									
	20		40		60		80		100	
	Температура, °С									
	+15	+25	+15	+25	+15	+25	+15	+25	+15	+25
Деревна тирса	4	10	7	15	22	30	41	60	63	90
Целюлозний сорбент	7	15	12	20	28	40	50	72	68	95
Еколан М	9	25	17	35	40	48	55	75	68	89
Еконадін	9	23	15	32	42	42	53	73	65	90
Термографеніт Е	15	30	35	50	48	75	82	90	90	98

При оцінці економічної ефективності вибору сорбентів трансформаторної оливи враховували їх насипну густина (об'ємну вагу), вартість у вітчизняній торговельній мережі, заявлену виробниками сорбційну ємність. Визначено вартість дослідних сорбентів у перерахунку на 1 кг ваги (таблиця 3.)

Таблиця 3 – Розрахована вартість сорбентів, необхідна для ліквідації розливу 1 т трансформаторної оливи

Сорбент	Сорбційна ємність, г/г	Ціна, грн/кг	Вартість, грн/т
Деревна тирса	5	5	1000
Целюлозний сорбент	12	60	4980
Еколан М	5	300	60000
Еконадін	8	264	33000
Термографеніт Е	40	350	4375

За співвідношенням нафтоємність: насипна густина: вартість найбільш економічно доцільним для ліквідації розливів трансформаторних олив є Термографеніт Е.

Висновки

1. Встановлено, що величини нафтоємності та сорбційної здатності обраних для дослідження сорбентів є доволі високими і можуть використовуватися для поглинання трансформаторної оливи. За цим показником проаналізовані сорбенти розміщуються в порядку зменшення поглинальних властивостей: Термографеніт Е, Еконадін, Еколан М, Целюлозний сорбент, Тирса.

2. Біосорбенти мають суттєві недоліки: висока вартість, обмеженість сорбційних властивостей при низьких температурах, повільність дії.

3. Низька собівартість деревної тирси робить її привабливим сорбентом для власників енергоустановок, але є складнощі із збором використаної тирси та подальшою її утилізацією. Целюлозний сорбент має кращі показники в порівнянні із звичайною сосновою тирсою, але модифікація (карбонізація) природної сировини значно підвищує її вартість.

4. З обраних сорбентів найбільш перспективним для використання в сучасних умовах при розливах трансформаторної оливи внаслідок бойових уражень трансформаторів на об'єктах енергетики є Термографеніт Е.

ЛІТЕРАТУРА

- Збитки довіллію від війни / Міністерство захисту довкілля та природних ресурсів України: офіц. вебсайт. URL: <https://mepr.gov.ua/topics/novyny/zbytku-dovkillyu-vid-vijny> (дата звернення: 10.05.2026).
- Атаки на енергетичну інфраструктуру України: Шкода цивільному населенню: бюлетень / Моніторингова місія ООН з прав людини в Україні. URL: <https://ukraine.ohchr.org/sites/default/files/2024-09/UKR> (дата звернення: 10.05.2026).
- Хохотва О. П., Іваненко О. І., Терещенко О. М. Розробка новітніх ресурсоефективних підходів до вирішення проблеми очистки нафтовмістних стічних вод. *Каталіз та нафтохімія*. 2023. № 34. С. 92–101. DOI: <https://doi.org/10.15407/kataliz2023.34.092>.
- Переваги та недоліки різних типів трансформаторних олій. URL: <https://eko-tehnika.com.ua/ua/preimushhestva-i-nedostatki-razlichnyh-tipov-transformatornyh-masel> (дата звернення: 10.05.2026).
- Воронін С. та ін. Критеріальний підхід для оцінки зміни властивостей моторних олив у процесі експлуатації та визначення строків їх заміни. *Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті*. 2025. Т. 30. № 3. С. 25–31. DOI: <https://doi.org/10.18664/iksz.v30i3.351393>.
- Правила улаштування електроустановок* / Міненерговугілля України. Київ, 2017. 617 с. URL: <https://zakon.isu.net.ua/sites/default/files/normdocs/pue.pdf>.
- Velkova V., Hybska H., Bubnikova T., Knapcova I. The Effect of Some Sorbents Used to the Oil Leaks Disposal. *Waste Forum*. 2018. № 3. P. 3–5. URL: https://www.wasteforum.cz/cisla/WF_3_2018.pdf.
- Heidari M. K., Fouladi M., Sooreh H. A., Tavakoli O. Superhydrophobic and super oleophilic natural sponge sorbent for crude oil/water separation. *Journal of Water Process Engineering*. 2022. Vol. 48. Article 102783. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2022.102783>.
- Fingas M. *The basics of Oil Spill Cleanup*. Boca Raton, Florida: Lewis publishers, 2001. 208 p. DOI: <https://doi.org/10.1201/9781420032598>.
- Baltrenas P., Vaishis V. Oil Product Uptake by Biosorbents. *Chemical and Petroleum Engineering*. 2004. Vol. 40. P. 54–58. DOI: <https://doi.org/10.1023/B:CAPE.0000024137.32123.c1>.
- Pavlov V. Arctic Marine Oil Spill Response Methods: Environmental Challenges and Technological Limitations. *Arctic Marine Sustainability* / ed.: E. Pongrácz, V. Pavlov, N. Hänninen. Springer Polar Sciences. Springer, Cham, 2020. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-030-28404-6_11.
- Li D., Zhu F. Z., Li J. Y., Na P., Wang N. Preparation and characterization of cellulose fibers from corn straw as natural oil sorbents. *Industrial & Engineering Chemistry Research*. 2013. Vol. 52. No. 1. P. 516–524. DOI: <https://doi.org/10.1021/ie302288k>.

13. Препарат «Еколан-М» для усунення наслідків нафтових забруднень довкілля / Інститут мікробіології та вірусології імені Д. К. Заболотного НАН України. URL: https://old.nas.gov.ua/text/EcolanM_preparat_microbiology (дата звернення: 10.05.2026).
14. Goldade V., Zhukalov V., Zotov S. Fibrous sorbents for gathering of oil and petroleum products. *ISJ Theoretical & Applied Science*. 2018. № 6 (62). P. 139–149. DOI: <https://doi.org/10.15863/TAS.2018.06.62.26>.
15. Колівошко О. М., Колівошко М. Ф. Техніко-економічна оцінка тирси різних порід дерев як сорбентів для очищення нафтопродуктів. *Machinery & Energetics*. 2021. Vol. 12. № 3. С. 137–142. URL: <https://technicalscience.com.ua/en/journals/t-12-3-2021/tyekhniko-yekonomichna-otsinka-tirsi-riznikh-porid-dyeryev-yak-sorbyentiv-dlya-ochishchennya-naftoproductiv> (дата звернення: 10.05.2026).
16. Калівошко О. М., Наумовська О. І., Бережняк Є. М., Паламарчук С. П., Павлюк С. Д. Еколого-економічне обґрунтування ефективності вуглецевих сорбентів на основі тирси різних порід дерев. *Біологічні системи: теорія та інновації. Серія: Екологія*. 2024. Т. 15. № 2. С. 28–40. DOI: [https://doi.org/10.31548/biologiya15\(2\).2024.003](https://doi.org/10.31548/biologiya15(2).2024.003).
17. Mojžiš M., Bubeníková T., Zachar M., Kačíková D., Štefková J. Comparison of natural and synthetic sorbents efficiency at oil spill removal. *BioResources*. 2019. Vol. 14. № 4. P. 8738–8752. URL: https://bioresources.cnr.ncsu.edu/wp-content/uploads/2019/09/BioRes_14_4_8738_Mojzis_BZKS_Comparison_Natural_Synth_Sorbents_Efficiency_Oil_Spill_Removal_15989.pdf.
18. Bacherikova I., Grinenko S., Kuznetsova L., Zazhigalov V., Bacherikov O. Дослідження впливу природи матеріалів органічного походження на видалення нафти з поверхні води. *Каталіз та нафтохімія*. 2021. № 31. С. 75–83. DOI: <https://doi.org/10.15407/kataliz2021.31.075>.
19. Ярошовець К., Ремезова О. Еколого-економічна ефективність використання торфових сорбентів для розв'язання екологічних проблем. *Вісник Київського національного університету імені Тараса Шевченка. Серія: Геологія*. 2021. № 1 (92). С. 103–107. DOI: <https://doi.org/10.17721/1728-2713.92.14>.
20. Adebajo M. O., Frost R. L., Klopogge J. T., Carmody O., Kokot S. Porous Materials for Oil Spill Cleanup: A review of Synthesis and Absorbing Properties. *Journal of Porous Materials*. 2003. Vol. 10. № 3. P. 159–170. DOI: <https://doi.org/10.1023/A:1027484117065>.
21. Khairallah I. A., Abass Z. A. A., Nasir M. I. Date Palm leaves Fiber Utilization as sorbent for Crude Oil Spill Cleanup and the Temperature Effect. *Journal of Petroleum Research and Studies*. 2013. Vol. 4. № 2. P. 74–87. DOI: <https://doi.org/10.52716/jprs.v4i2.99>.
22. Казанок А. В., Матвеева О. Л. Очищення нафтозабруднених стічних вод за допомогою біосорбентів. *Наукові технології*. 2014. № 1 (21). С. 131–134. DOI: <https://doi.org/10.18372/2310-5461.21.6080>.

UDC [502.174:54-414]:621.315.615

OPTIMIZATION OF LOCAL SORBENT SELECTION FOR MITIGATING TRANSFORMER OIL SPILLS RESULTING FROM THE DESTRUCTION OF ENERGY INFRASTRUCTURE FACILITIES

L. Yashchuk

Candidate of Chemical Sciences, Associate Professor

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8975-851X>

Cherkasy State Technological University

460 Shevchenka Blvd., Cherkasy, 18006, Ukraine

I. Maladyka

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8784-2814>

Cherkasy State Technological University

460 Shevchenka Blvd., Cherkasy, 18006, Ukraine

DOI: <https://doi.org/10.52363/2522-1892.2026.1.6>

Received: May 4, 2026

Accepted: May 29, 2026

Published: May 30, 2026

Cite as: Yashchuk, L., Maladyka, I. (2026). Optimization of local sorbent selection for mitigating transformer oil spills resulting from the destruction of energy infrastructure facilities. *Technogenic and Ecological Safety*, 19(1/2026), 45–52. <https://doi.org/10.52363/2522-1892.2026.1.6>

Open Access License: Creative Commons Attribution 4.0 International License

Abstract. A distinctive feature of the war during 2024–2026 is the enemy's coordinated military campaign to destroy Ukraine's electric power sector. Ukrainian power substations, particularly those built during the Soviet era, are equipped with transformers filled with transformer oil containing high levels of PCBs. Damage to such substations causes transformer oil spills into the environment. To clean up oil spill sites, sorbents of synthetic and organic origin are used. This study analyzes the physicochemical properties of five sorbents: oil capacity, hydrophobicity, and reaction rate. When evaluating the economic efficiency of transformer oil sorbents, their bulk density (specific gravity), cost in the domestic retail market, and the sorption capacity declared by manufacturers were taken into account. Gravimetric and calculation methods were used to assess the effectiveness of the selected sorbents. A comparative analysis of the sorption capacity of the tested transformer oil sorbent samples was also conducted. The experiments were carried out under laboratory conditions in the winter (air temperature +15°C) and in the spring (+25°C) of 2024–2025. Transformer oil of the T-1500 grade (DSTU 4452:2005) was used as the petroleum product. A necessary condition for the selection of sorbent samples was that they be produced by domestic manufacturers in Ukraine.

Based on the results of studies and calculations, Thermographene E is the most promising material for cleaning up transformer oil spills. The disadvantages of the Ekonadin and Ecolan M biosorbents include high cost, limited sorption properties at low temperatures, and slow action. The low cost of wood shavings makes them an attractive sorbent for power plant owners, but difficulties in collecting used shavings and the problem of their subsequent disposal limit this choice. The practical value of this study lies in optimizing the selection of national sorbents for mitigating the consequences of transformer oil spills, taking into account their advantages and disadvantages.

Key words: adsorbent, oil capacity, hydrophobicity, sorption rate, temperature, floating, bioadsorbent, carbonization.

REFERENCES

1. Ministry of Environmental Protection and Natural Resources of Ukraine. (2026). Zbytky dovkilliu vid viiny [Environmental damage caused by the war]. Official website. <https://mepr.gov.ua/topics/novyny/zbytky-dovkilliyu-vid-viiny> (accessed: 10.05.2026) [in Ukrainian].
2. UN Human Rights Monitoring Mission in Ukraine. (2024). Ataky na enerhetychnu infrastrukturu Ukrainy: shkoda tsyvilnomu naselenniu [Attacks on Ukraine's energy infrastructure: harm to the civilian population]. Bulletin. <https://ukraine.ohchr.org/sites/default/files/2024-09/UKR> (accessed: 10.05.2026) [in Ukrainian].

3. Khokhotva, O. P., Ivanenko, O. I., & Tereshchenko, O. M. (2023). Rozrobka novitnikh resursoefektyvnykh pidkhodiv do vyrishennia problemy ochystky naftovmistnykh stichnykh vod [Development of newest resource-efficient approaches to solving the problem of oil-containing wastewater treatment]. *Kataliz ta Naftokhimiia*, 34, 92–101. <https://doi.org/10.15407/kataliz2023.34.092> [in Ukrainian].
4. Perevahy ta nedoliky ryznykh typiv transformatornykh olii [Advantages and disadvantages of various types of transformer oils]. (2026). <https://eko-tehnika.com.ua/ua/preimushhestva-i-nedostatki-razlichnyh-tipov-transformatornykh-masel> (accessed: 10.05.2026) [in Ukrainian].
5. Voronin, S., et al. (2025). Kryterialnyi pidkhid dlia otsinky zminy vlastyvoستي motornykh olyv u protsesi ekspluatatsii ta vyznachennia strokiv yikh zaminy [Critical approach for evaluating changes in the properties of motor oils during operation and determining their replacement intervals]. *Informatsiino-keruiuchi systemy na zaliznychnomu transporti*, 30(3), 25–31. <https://doi.org/10.18664/iksz.v30i3.351393> [in Ukrainian].
6. Ministry of Energy and Coal Industry of Ukraine. (2017). *Pravyla ulashtuvannia elektroustanovok* [Electrical installation rules]. Kyiv. 617 p. <https://zakon.isu.net.ua/sites/default/files/normdocs/pue.pdf> [in Ukrainian].
7. Velkova, V., Hybska, H., Bubnikova, T., & Knapcova, I. (2018). The effect of some sorbents used to the oil leaks disposal. *Waste Forum*, 3, 3–5. https://www.wasteforum.cz/cisla/WF_3_2018.pdf.
8. Heidari, M. K., Fouladi, M., Sooreh, H. A., & Tavakoli, O. (2022). Superhydrophobic and super oleophilic natural sponge sorbent for crude oil/water separation. *Journal of Water Process Engineering*, 48, Article 102783. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2022.102783>.
9. Fingas, M. (2001). *The basics of oil spill cleanup*. Boca Raton, Florida: Lewis Publishers. 208 p. <https://doi.org/10.1201/9781420032598>.
10. Baltrenas, P., & Vaishis, V. (2004). Oil product uptake by biosorbents. *Chemical and Petroleum Engineering*, 40, 54–58. <https://doi.org/10.1023/B:CAPE.0000024137.32123.c1>.
11. Pavlov, V. (2020). Arctic marine oil spill response methods: environmental challenges and technological limitations. In E. Pongrácz, V. Pavlov, & N. Hänninen (Eds.), *Arctic Marine Sustainability*. Springer Polar Sciences. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-28404-6_11.
12. Li, D., Zhu, F. Z., Li, J. Y., Na, P., & Wang, N. (2013). Preparation and characterization of cellulose fibers from corn straw as natural oil sorbents. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 52(1), 516–524. <https://doi.org/10.1021/ie302288k>.
13. Zabolotny Institute of Microbiology and Virology of the NAS of Ukraine. (2026). Preparat “Ekolan-M” dlia usunennia naslidkiv naftovykh zabrudnen dovkillia [“Ecolan-M” preparation for elimination of oil pollution consequences in the environment]. https://old.nas.gov.ua/text/EcolanM_preparat_microbiology (accessed: 10.05.2026) [in Ukrainian].
14. Goldade, V., Zhukalov, V., & Zotov, S. (2018). Fibrous sorbents for gathering of oil and petroleum products. *ISJ Theoretical & Applied Science*, 6(62), 139–149. <https://doi.org/10.15863/TAS.2018.06.62.26>.
15. Kolivoshko, O. M., & Kolivoshko, M. F. (2021). Tekhniko-ekonomichna otsinka tyrsy ryznykh porid derev yak sorbentiv dlia ochyshchennia naftoproduktiv [Technical and economic evaluation of sawdust of different tree species as sorbents for oil product purification]. *Machinery & Energetics*, 12(3), 137–142. <https://technicalscience.com.ua/en/journals/t-12-3-2021/tyekhniko-yekonomichna-otsinka-tirsi-ryznikh-porid-dyeryev-yak-sorbentiv-dlya-ochyshchennya-naftoproduktiv> (accessed: 10.05.2026) [in Ukrainian].
16. Kalivoshko, O., Naumovska, O., Berezniak, Ye., Palamarchuk, S., & Pavliuk, S. (2024). Ekolohe-ekonomichne obgruntuvannia efektyvnosti vuhletsevykh sorbentiv na osnovi tyrsy ryznykh porid derev [Ecological and economic substantiation of the efficiency of carbon sorbents based on sawdust of various tree species]. *Biologichni systemy: teoriia ta innovatsii. Serii: Ekolohiia*, 15(2), 28–40. [https://doi.org/10.31548/biologiya15\(2\).2024.003](https://doi.org/10.31548/biologiya15(2).2024.003) [in Ukrainian].
17. Mojžiš, M., Bubeníková, T., Zachar, M., Kačíková, D., & Štefková, J. (2019). Comparison of natural and synthetic sorbents efficiency at oil spill removal. *BioResources*, 14(4), 8738–8752. https://bioresources.cnr.ncsu.edu/wp-content/uploads/2019/09/BioRes_14_4_8738_Mojzis_BZKS_Comparison_Natural_Synth_Sorbents_Efficiency_Oil_Spill_Removal_15989.pdf.
18. Bacherikova, I. V., Grinenko, S. B., Kuznetsova, L. S., Zazhigalov, V. O., & Bacherikov, O. V. (2021). Doslidzhennia vplyvu pryrody materialiv orhanichnogo pokhodzhennia na vydalennia nafty z poverkhnii vody [Investigation of the influence of the nature of materials of organic origin on the removal of oil from the water surface]. *Kataliz ta Naftokhimiia*, 31, 75–83. <https://doi.org/10.15407/kataliz2021.31.075> [in Ukrainian].
19. Yaroshovets, K., & Remezova, O. (2021). Ekolohe-ekonomichna efektyvnist vykorystannia torfovykh sorbentiv dlia rozviazannia ekolohichnykh problem [Ecological and economic efficiency of using peat sorbents for solving environmental problems]. *Visnyk Kyivskoho natsionalnogo universytetu imeni Tarasa Shevchenka. Serii: Heolohiia*, 1(92), 103–107. <https://doi.org/10.17721/1728-2713.92.14> [in Ukrainian].
20. Adebajo, M. O., Frost, R. L., Klopogge, J. T., Carmody, O., & Kokot, S. (2003). Porous materials for oil spill cleanup: a review of synthesis and absorbing properties. *Journal of Porous Materials*, 10(3), 159–170. <https://doi.org/10.1023/A:1027484117065>.
21. Khairallah, I. A., Abass, Z. A. A., & Nasir, M. I. (2013). Date palm leaves fiber utilization as sorbent for crude oil spill cleanup and the temperature effect. *Journal of Petroleum Research and Studies*, 4(2), 74–87. <https://doi.org/10.52716/jprs.v4i2.99>.
22. Kazanok, A. V., & Matvieieva, O. L. (2014). Ochyshchennia naftozabrudnenykh stichnykh vod za dopomohoiu biosorbentiv [Purification of oil-contaminated wastewater using biosorbents]. *Naukoiemni tekhnologii*, 1(21), 131–134. <https://doi.org/10.18372/2310-5461.21.6080> [in Ukrainian].