

ЕКОЛОГО-ЕКОНОМІЧНЕ ОБГРУНТУВАННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ВУГЛЕЦЕВИХ СОРБЕНТІВ НА ОСНОВІ ТИРСИ РІЗНИХ ПОРІД ДЕРЕВ

О.М. КАЛІВОШКО,

*доктор економічних наук, професор кафедри адміністративного
менеджменту та зовнішньоекономічної діяльності
alek-k@ukr.net*

<https://orcid.org/0000-0003-0417-4529>

О.І. НАУМОВСЬКА,

*кандидат сільськогосподарських наук, доцент кафедри екології
агросфери та екологічного контролю
naumovska@nubip.edu.ua*

<https://orcid.org/0000-0002-8737-3568>

Є.М. БЕРЕЖНЯК,

*кандидат сільськогосподарських наук, доцент кафедри екології
агросфери та екологічного контролю
beregniakem@nubip.edu.ua*

<https://orcid.org/0000-0001-5945-1285>

С.П. ПАЛАМАРЧУК,

*кандидат сільськогосподарських наук, доцент кафедри екології
агросфери та екологічного контролю
spal@i.ua*

<https://orcid.org/0000-0002-9083-6850>

С.Д. ПАВЛЮК,

*кандидат сільськогосподарських наук, доцент кафедри екології
агросфери та екологічного контролю
pavlyuksd@ukr.net*

<https://orcid.org/0000-0003-0025-3975>
Національний університет біоресурсів і природокористування України

Анотація. У роботі проаналізовано ефективність застосування вуглецевих сорбентів на основі тирси різних порід дерев у знешкодженні забруднень паливно-мастильними матеріалами. Обґрунтовано переваги застосування методу сорбції, як ефективного, поширеного, простого та доступного заходу для очищення від нафтопродуктів. Акцентовано увагу на якості сорбуючого матеріалу за використання вуглецевих сорбентів із тирси різних порід дерев. Дано структурні, фізико-хімічні, поглинальні й сорбційні характеристики вуглецевих сорбентів із рослинної сировини та показано ефективність їх

використання для очищення водного й ґрунтового середовища. Розкрито екологічні й економічні переваги очищення водного та ґрунтового середовища від нафтопродуктів вуглецевими сорбентами з рослинної сировини, порівняно з іншими методами та засобами очищення. Мета роботи полягала в аналізі ефективності дії вуглецевих сорбентів із тирси різних порід дерев у боротьбі із нафтовими забрудненнями. Методи досліджень – загальноприйняті.

Встановлено, що тирса сосни і грабу має велику нафтоємність і сорбційну здатність, яка у 2,1-2,5 рази вища, порівняно із вуглецевими сорбентами із тирси інших порід дерев, завдяки чому може ефективно використовуватися у знешкодженні нафтових розливів. Термічна обробка тирси активізує її сорбційну ємність та нафтоємність у 2,3-4,1 рази, що вказує на її екологічну ефективність у адсорбції паливно-мастильних матеріалів. Оптимальна температура процесу карбонізації тирси становить у межах 250-300°C, а тривалість – 9,0-10,5 хвилин. Відзначаємо також і економічну ефективність внесення вуглецевих сорбентів у 2,5-4,0 рази, порівняно із застосуванням звичайної тирси.

Ключові слова: нафтопродукти, вуглецеві сорбенти, тирса, карбонізація, деструкція полімерних ланцюгів, нафтоємність, енергетичні затрати.

Вступ.

Нафтопродукти, які у великих об'ємах використовуються транспортними засобами, поширене джерело забруднення природних ресурсів. Із загальної кількості паливно-мастильних матеріалів, які виробляються та використовуються, понад 2% потрапляє у навколишнє середовище. Стає очевидним, що небезпеку для довкілля становлять як самі нафтопродукти, так і домішки, які вони містять. Проникаючи у ґрунтову товщу та потрапляючи у водні об'єкти, нафтопродукти завдяки фізико-хімічним реакціям і біологічним взаємодіям, перетворюються у токсичні та шкідливі речовини для біоти. Тому очищення води та ґрунту від паливно-мастильних матеріалів методом сорбції є організаційно, технологічно, економічно й екологічно доцільним і необхідним. У зв'язку із цим особливі ролі, значення і поширення набувають вуглецеві сорбенти на основі

рослинної сировини. Дослідження суті процесів карбонізації, фізико-хімічних перетворень структурно-сорбційних властивостей вуглецевих сорбентів, сировиною яких є тирса різних порід дерев та процесів сорбції ними нафтопродуктів потребують подальшого вивчення та аналізу.

Аналіз останніх досліджень і публікацій.

Забруднення води продуктами нафтопереробки негативно впливає на флору і фауну водойм, у результаті чого погіршуються умови їх існування, відбуваються порушення екологічної рівноваги у водних екосистемах, уповільнюються процеси самоочищення (Shahzad, A. at el, 2020; Karam, Q., 2021; Mohammad, A., 2021; Плаксі́й Л.В., 2016). Нафтопродукти, які потрапляють до водного та ґрунтового середовищ, обумовлюють певні зміни у них (Cruz, 2013; Turner, N., 2021; Бондарюк Р. М. та ін., 2017;

UNEP, 2020), викликаючи шкідливе та небезпечне забруднення довкілля продуктами їх розкладу (Наконечний І. В. та ін., 2023). Компоненти нафти, зокрема різні смоли, парафіни, асфальтени закупорюють міжагрегатні та внутрішньо агрегатні пори ґрунту, міцно зв'язуючи ґрунтові частинки, цементуючи їх. Різноманіття методів і засобів боротьби із нафтовими забрудненнями визначається складом нафти і нафтопродуктів, а також процесами фізико-хімічних перетворень за їх потрапляння у навколишнє середовище.

Серед існуючих методів зменшення забруднення продуктами нафтових компонентів широко застосовується фізико-хімічний, принцип дії якого ґрунтується на сорбційній здатності очищення води від нафтопродуктів. Він є доволі швидким, ефективним та з мінімальним впливом на навколишнє середовище. У результаті використання сорбентів можна отримати менш токсичні або ж навіть нетоксичні сполуки (Mojžiš, M., 2019; Шевчик-Костюк Л. З. та ін., 2022). Відповідно ефективними, поширеними та доступними є сорбенти для очищення ґрунтових і водних екосистем із широким спектром дії від різних небезпечних забруднень.

Для ліквідації забруднень нафтового походження у світовому масштабі використовуються понад 200 видів сорбентів (Quyang, D., 2023; Meez, E., 2021; Головань Л. В. та ін., 2021). Усі вони різняться між собою за походженням, дисперсністю, призначенням та способами утилізації. Необхідно зауважити, що якість сорбентів визначається їх ємністю по відношенню до нафти, ступенем гідрофобності, плавучістю опісля поглинання нафти та нафтопродук-

тів, можливістю утилізації сорбенту. Однак у заходах з ліквідації наслідків нафтового поширення та відновлення порушених земель необхідно керуватися принципом мінімізації впливу на екосистеми, які уже зазнали забруднень (Khan et al, 2018).

В останні десятиліття сорбенти набувають широкого застосування, передусім для очистки ґрунтів та води від нафтопродуктів (Діюк В. Є., 2017). Оскільки різні галузі промисловості продовжують здійснювати техногенне навантаження на довкілля (Kucher et al, 2023), то варто відзначити, що вуглецеві сорбенти залишаються одними із найзатребуваніших матеріалів для поліпшення стану навколишнього середовища (Шендрік Т. Г., та ін., 2021). Вуглецеві сорбенти отримані на основі побічної продукції сільськогосподарського виробництва, а також деревообробної галузі – тирси, яка береться від основних порід дерев, які поширені у лісових екосистемах України (Beregnyak et al, 2023) суттєво різняться своїми властивостями й характеристиками (Калівошко М. Ф., 2021). Значний вплив на сорбційні показники абсорбентів мають технології і процеси, що відбуваються при отриманні вуглецевих сорбентів (Роговський І. Д. та ін., 2020).

Широкого застосування у якості сорбентів набули торфові сумішки, оскільки ця природна сировина є загальнодоступною, нетоксичною та відносно дешевою у добуванні. Використання торфової маси, як поглинач нафтових забруднень, визначається універсальністю властивостей його, як адсорбенту. Серед переліку адсорбентів слід звернути увагу на експлоатований графіт, який є екологічно чистим матеріалом. Він характеризується низькою щільністю, високою

пористістю, крім того досить легко утилізується. Завдяки своїй пористій структурі є добрим адсорбентом із високою сорбційною здатністю для ліквідації розливів нафти (Забулонов Ю. Л. та ін., 2021). Одним із дієвих варіантів щодо знешкодження нафтових забруднень є використання пінопласту. Згідно із дослідженнями Н. І. Глібовицької та Л. В. Плаксія (2019) середній час сорбції нафтової плями цим матеріалом становить 0,86 см/с.

Відмічається висока поглинальна здатність деревних відходів та їх ефективний прояв сорбційних властивостей. Зокрема, на основі лігніну опісля його термічної і хімічної обробки отримують ефективні екологобезпечні сорбенти широкого спектру дії. Так, тирса ефективно застосовується для вилучення іонів міді із промислових відходів (Бондаренко Л. Ю., 2021). Більшість органічних природних сорбентів (тирса, солома, зернове лушпиння, торф, листя) серед переваг мають біодеградацію та здатність вбирати нафту від 5 до 15 разів, що перевищує вагу самого сорбенту (Літвак С. М., Літвак О. А., 2023).

Нині, за умов воєнного стану в Україні, доволі частими є руйнування від ракетних обстрілів російської федерації нафтових комплексів, складів із паливно-мастильними матеріалами, знешкодження АЗС, тощо. Тому забруднені земельні ресурси, території потребують постійного всебічного незараження та ефективних методів відновлення від взаємодії із поллютантами (Сплодитель А., 2023; Строкаль В. та ін., 2023; Макаренко Н. А. та ін., 2022). Знаходимо дані, що вуглецеві сорбенти на основі тирси, мають ліпші сорбційні й поглинальні характеристики, порівняно

із сорбентами, отриманими із іншої рослинної сировини (Калівошко М. Ф., 2021). За даними С. К. Назаренко та Л. В. Архипової (2016) коефіцієнт нафтопоглинання тирси становить 1:1, а ефективність очистки становить 67%. Так, будова, властивості, шляхи отримання та застосування вуглецевих сорбентів на основі рослинницької сировини суттєво різняться (Калівошко, 2021, 2022 і 2022, Діюк, Роговський). У той же час, сорбційні та поглинальні характеристики, фізико-хімічні властивості й процеси перетворення побічної продукції деревообробної промисловості, а саме використання тирси різних порід дерев, як вуглецевих сорбентів, з метою очищення водних і ґрунтових екосистем, проведення їх екологічної й економічної оцінки, ще недостатньо досліджені.

Мета досліджень. Метою досліджень було вивчення фізико-хімічних, структурних і поглинальних властивостей тирси різних порід дерев та отриманих із неї вуглецевих сорбентів. Також аналізували технічні і технологічні процеси, ступінь і повноту очищення отримання вуглецевих сорбентів з рослинної сировини, обґрунтовували екологічну та економічну доцільність використання вуглецевих сорбентів отриманих з тирси сосни та граба для очищення водного середовища та ґрунтів від нафтопродуктів.

Матеріали і методи дослідження.

У роботі було використано наступні методи досліджень. Сорбційну ємність (нафтоємність) визначали ваговим методом за різницею між насиченим і вихідним сорбентом. Статичну об'ємну ємність (СОЄ) – за до-

помогою фіксації наважки сорбенту з відповідним об'ємом NaOH з послідовним титруванням розчином HCl. Ексикаторний метод (вловлювання парів бензолу і води) застосовували для визначення сорбційного об'єму пор тирси різних порід дерев і рослинної продукції (солома, листя).

Результати дослідження та їх обговорення

Відходи рослинної сировини є ефективними сорбентами для очищення водного і ґрунтового середовищ від нафтопродуктів. Проведені дослідження показують, що утворена тирса, значні об'єми якої накопичуються у деревообробній галузі, від таких порід дерев, як сосна і граб має дещо кращі фізико-хімічні, структурні властивості, сорбційні й поглинальні характеристики, порівняно із іншими сорбентами рослинного походження (табл. 1).

За результатами власних досліджень та інших вчених підтверджується той факт, що сорбенти за ємності поглинання нафтопродуктів у межах 2-3 г мг-екв/г і більше вико-

ристовуються для очищення ґрунту і водного середовища. У той же час тирса таких порід дерев, як сосна, граб і горіх за природної вологості близько 50-60 % має ємність поглинання нафтопродуктів у межах 2,4-2,7 мг-екв/г, що відповідає необхідним вимогам й може використовуватися для сорбції ґрунтів забруднених нафтопродуктами. Разом з тим тирса, що отримана безпосередньо на виробництві, за своєї природної вологості внаслідок тривалого зберігання (навіть за дотримання усіх відповідних вимог), завдяки інтенсивним мікробіологічним процесам у вологому середовищі може псуватися, а тому потребує відповідних умов і правил зберігання.

З метою поліпшення структурних, фізико-хімічних і сорбційних властивостей рослинної сировини досить часто впроваджують процес карбонізації. Варто зауважити, що це ефективний засіб отримання вуглецевих сорбентів із рослинної сировини у процесі її термічної обробки, який розпочинається із нагрівання вихідної сировини за температури вище 110-120°C. Карбонізація лігні-

1. Поглинальні та сорбційні характеристики тирси різних порід дерев та побічної рослинної продукції за вологості 50-60 %

Розмір фракцій	Нафто-поглинання (масова адсорбційна нафтоємність) <i>a</i> , г/г	Статична об'ємна ємність (COE), мг-екв/г	Об'єм сорбційних пор за бензолом, Vs(C ₆ H ₆), см ³ /г	Об'єм сорбційних пор за водою, Vs(H ₂ O), см ³ /г	Питома поверхня, Спит., м ² /г
Тирса сосни	2,7	2,6	0,07	1,0	8,4
Тирса горіха	2,3	1,9	0,03	0,5	7,9
Тирса берези	1,9	1,6	0,03	0,4	7,9
Тирса осики	2,1	1,7	0,03	0,4	7,9
Тирса граба	2,4	2,2	0,04	0,6	8,0
Солома	1,6	0,3	0,03	0,4	7,3
Листя	1,1	0,2	0,02	0,4	6,2

ну призводить до утворення вуглецевих матеріалів з розвинутою поруваною структурою (Галиш В. В., 2022). Завдяки карбонізації збільшується загальний об'єм пор, що позитивно сприяє сорбційній здатності вуглецевих матеріалів. Оскільки тирса дерев має ліпші властивості, порівняно із соломом злакових культур і листям дерев, ми досліджували технологічну сутність отримання вуглецевих сорбентів з неї та їх ефективність. Внаслідок того, що вуглеводна частина тирси більшості порід дерев складається із целюлози і геміцелюлози, а комплекс їх ароматичних речовин – із лігніну, то завдяки карбонізації відбуваються складні, послідовні і глибокі процеси деструкції їх полімерних ланцюгів із виділенням, як смолистих речовин досить складної будови, так і великої кількості летких речовин. Процеси карбонізації ми досліджували в діапазоні від 100 до 400 °C через кожні 50 °C.

За результатами досліджень встановлено, що процес карбонізації тирси різних порід дерев розпочинається за температури 120-130 °C. Зростання температур до 200-300 °C активізує реакції деструкції геміцелюлози, целюлози та лігніну, що супроводжується складними процесами перетворень, за яких відбувається виділення простих вуглецевих сполук, зокрема вуглекислого газу і оксиду вуглецю, зрідженої суміші та смол. На різних стадіях процесу карбонізації, що обумовлена температурними параметрами, інтенсивність та величина енергії активації деструктивних перетворень суттєво змінюється, тому що в межах певних температурних діапазонів відбувається розклад компонентів тирси різних порід дерев – геміцелюлози, а потім целюлози і лігніну. Отримані

результати карбонізації тирси дерев вказують на складність фізико-хімічних процесів розкладання та перетворення геміцелюлози, целюлози та лігніну.

За карбонізації тирси відбуваються процеси деструкції полімерних ланцюгів вихідної сировини із виділенням летких речовин (оксиду вуглецю (CO), вуглекислого газу, вуглеводнів насиченого, ненасиченого і ароматичного рядів, спиртів, кетонів, альдегідів і органічних кислот), а також смол і смолистих речовин. Внаслідок цього утворюються різного роду мікро- і мезопори у формі кратерів, розтріскування та формується пориста структура. Розвиток пористої структури у процесі карбонізації обумовлений як вигоранням окремих областей вихідної сировини, так і окисненням її поверхні продуктами, що виділяються, насамперед, водяною парою і вуглекислим газом. Пори створюють у твердому тілі вуглецевого сорбенту доволі значну внутрішню поверхню. Така розвинена й велика за площею пориста поверхня забезпечує доступність функціональних груп та швидкість реакцій, які на ній протікають.

Сорбенти, які характеризуються сорбційним об'ємом пор у межах 0,6-2,0 см³/г, досить суттєво обумовлюють зниження концентрації нафтопродуктів. Проведення карбонізації у низькотемпературному одностадійному режимі сприяє значному зростанню об'єму пористої структури карбонатів з тирси дерев. Максимальне значення сорбційного об'єму пор вуглецевих сорбентів з тирси різних порід дерев, які досліджувалися, має сорбент із тирси сосни, що був отриманий за оптимальних умов карбонізації.

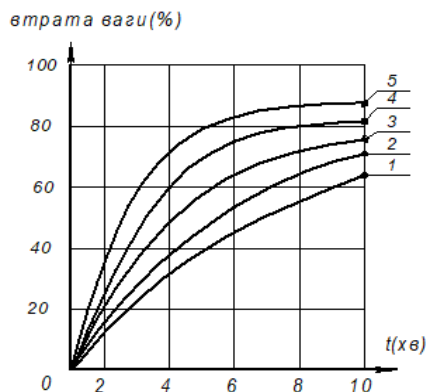


Рис. 1. Кінетичні криві карбонізації зразків тирси сосни при температурі (°C): 1 – 250, 2 – 300, 3 – 350, 4 – 400, 5 – 450

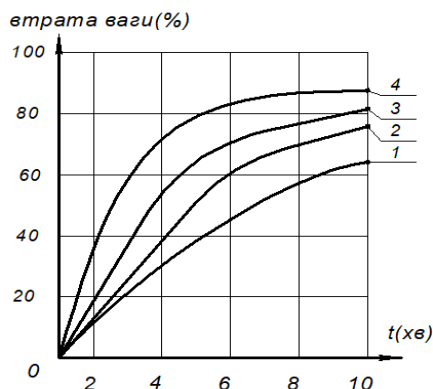


Рис. 2. Кінетичні криві карбонізації зразків тирси горіха при температурі (°C): 1 – 250, 2 – 300, 3 – 350, 4 – 450

Отже, отримані дані вказують на складність процесу карбонізації. Очевидно, що у цьому процесі беруть участь надзвичайно складні й елементарні радикальні реакції, які мають різні кінетичні параметри проходження та протікають у широкому діапазоні температурних областей. Процес карбонізації тирси різних порід дерев досліджували за температури 250-450°C із інтервалом у 50°C, а тривалість від 3-ої до 9-ої хвилини, через кожні 3 хвилини. Слід відмітити, що в результаті карбонізації вага тирси зменшується і цю закономірність досить чітко видно на рисунках 1 і 2.

Аналізуючи кінетичні криві втрат вологи (рис. 3-5) можна бачити, що за усіх досліджуваних режимів термообробки, карбонізацію тирси не доцільно здійснювати до випалу більше 70-75 %, оскільки зменшується вихід вуглецевих сорбентів та відбувається деструкція пористої структури. Встановлено, що за кожної досліджуваної температури, режим її карбоні-

зації має певне оптимальне значення тривалості за якого нафтосорбційна ємність отриманого вуглецевого сорбенту є максимальною.

Графіки показують (рис. 1-5), що найоптимальнішими умовами карбонізації тирси різних порід дерев слід вважати температуру у межах 250-300°C за тривалості процесу у межах 9,0-9,5 хвилини. Сорбенти, які характеризуються сорбційним об'ємом пор в межах 0,6-2,0 см³/г здатні суттєво знижувати концентрацію нафтопродуктів. Виявлено, що із зростанням сорбційного об'єму пор сорбенту збільшується пористість, а його насипна щільність (Δ , г/см³) зменшується (рис. 6). Для тих сорбентів, які брали участь в експерименті, така закономірність цілком підтверджується відповідними результатами досліджень.

Проведені дослідження показали (рис. 6), що для вибраних нами сорбентів ця залежність підтверджується. Таким чином, вуглецеві сорбенти, які отримані шляхом карбонізації

втрата ваги(%)

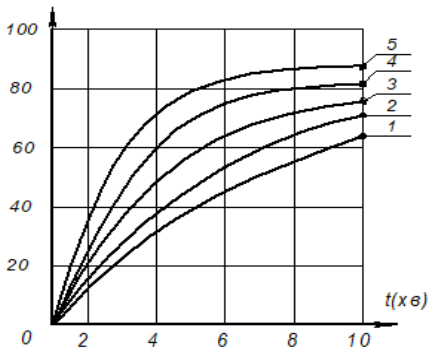


Рис. 3. Кінетичні криві карбонізації зразків тирси берези за температури (°C): 1 – 250, 2 – 300, 3 – 350, 4 – 400, 5 – 450

втрата ваги(%)

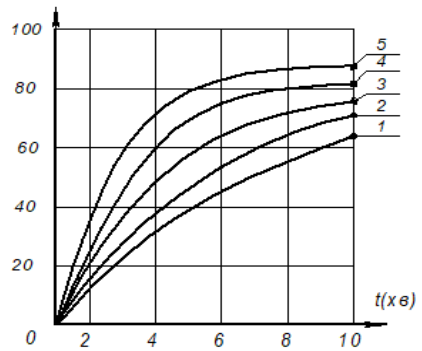


Рис. 4. Кінетичні криві карбонізації зразків тирси осики за температури, °C: 1 – 250, 2 – 300, 3 – 350, 4 – 400, 5 – 450

втрата ваги(%)

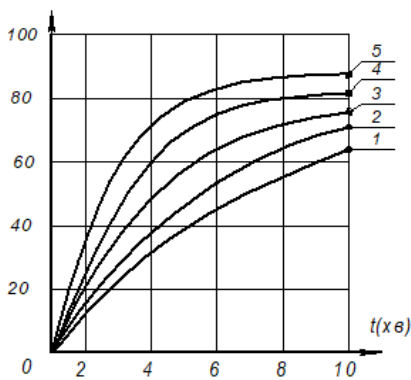


Рис. 5. Кінетичні криві карбонізації зразків тирси граба за температури (°C): 1 – 250, 2 – 300, 3 – 350, 4 – 400, 5 – 450

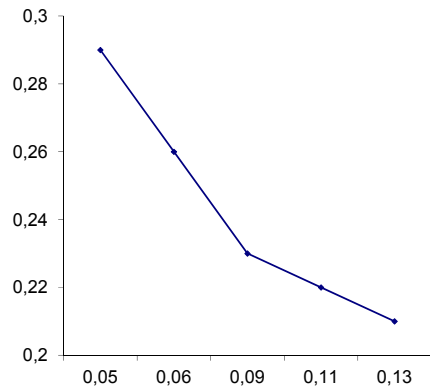


Рис. 6. Залежність між величиною сорбційного об'єму пор та значенням щільності вуглецевого сорбенту на основі тирси сосни

тирси різних порід дерев, мають кращі фізико-хімічні, структурні показники, нафтоємність, а величина сорбції до нафтопродуктів зростає у декілька разів, порівняно з вихідною продукцією (табл. 2).

Слід відзначити, що сорбційна ємність вуглецевих сорбентів з тирси осики та берези знаходиться у діапа-

зоні від 2,0 до 2,1 мг-екв/г. У той же час величина поглинання вуглецевих сорбентів із тирси горіха становить 2,3 мг-екв/г, а максимальні її показники спостерігаються у карбонатів з тирси граба та сосни відповідно 2,8 та 3,5 мг-екв/г. Доречно звернути увагу на те, що нафтоємність тирси різних порід дерев не дуже різнилася

2. Поглинальні і сорбційні характеристики вуглецевих сорбентів із тирси різних порід дерев за вологості 50-60%

Показник	Сосни	Горіха	Берези	Осики	Граба
Нафтоємність а, г/г	11,2	5,4	4,5	4,7	7,6
Об'єм сорбційних пор за бензолом, $V_s(C_6H_6)$, см ³ /г	0,09	0,05	0,04	0,04	0,07
Об'єм сорбційних пор за водою, $V_s(H_2O)$, см ³ /г	0,12	0,09	0,07	0,07	0,10
Статична об'ємна ємність (СОЄ), мг-екв/г	3,6	2,3	2,0	2,1	2,8
Питома поверхня, Спит, м ² /г	13,1	10,1	10,0	10,0	11,1
Зольність, %	1,0	2,1	1,0	1,0	2,5

між собою. Проте карбонати тирси сосни мали вищу нафтоємність у 2,1-2,5 рази, порівняно із вуглецевими сорбентами із тирси горіху, берези та осики і в 1,5 рази вищу, ніж із грабу.

З практичної точки зору важливе значення відіграє економічна ефективність використання сорбентів. У випадках застосування тирси у якості сорбентів, витрати будуть пов'язані із її внесенням, збиранням та утилізацією. Окрім зазначених витрат, їх отримання пов'язане із додатковими енергетичними затратами і, відповідно, зростанням собівартості сорбентів. Проте розрахунки показали, що вносити вуглецеві сорбенти із тирси є раціональнішим заходом, порівняно із звичайним застосуванням тирси. Вуглецеві сорбенти мають нафтоємність у 2,5-4,0 рази вищу, порівняно із вихідною сировиною, тому їх вносять меншу кількість, відповідно у 3-4 рази за тої самої сорбційної й нафтопоглинальної ефективності.

Внесення, а особливо збирання сорбентів після використання, є складним і затратним процесом. Сумарні затрати на карбонізацію тирси різних порід дерев та застосування меншого об'єму вуглецевих сорбентів для знезараження нафтопродуктів

не перевищують затрат, які пов'язані із використанням тирси. Слід врахувати також, що використання вуглецевих сорбентів для поглинання нафтопродуктів, пов'язане як з меншими затратами на застосування (у 3-4 рази менші об'єми їх внесення і збирання), так і на утилізацію, порівняно з побічною продукцією рослинного походження. Оптимальною температурою карбонізації тирси різних порід дерев є температура 300°C за тривалості процесу у межах 9,0-9,5 хвилин, а допустимою - 250°C за тривалості процесу у 10-10,5 хвилин.

Висновки.

1. Встановлено, що величини нафтоємності та сорбційної здатності тирси різних порід дерев, особливо сосни і грабу, є доволі високими і можуть використовуватися для поглинання паливно-мастильних матеріалів. Найкращим поглиначем нафтових забруднень була тирса сосни, нафтоємність якої становила 11,2 г/г, що у 2,1-2,5 рази вища, порівняно із вуглецевими сорбентами із тирси горіха, берези й осики та у 1,5 рази, ніж із тирси грабу. Для отримання вуглецевих сорбентів за відсутності тирси

сосни також доцільно використовувати тирсу грабу. Навіть той факт, що тирса грабу поступається своїми сорбційними властивостями карбонатам з тирси сосни, не зменшує вагомості її застосування і теж є ефективною у знешкодженні нафтових забруднень.

2. Процес термічної обробки тирси сприяє збільшенню сорбційної ємності отриманих вуглецевих сорбентів майже у 1,5 рази, а нафтоємність при цьому зростає у 2,3-4,1 рази. Карбонізацію тирси різних порід дерев доцільно проводити за температури 250-300°C протягом 9,0-10,5 хвилин, що підвищує структурно-сорбційні й поглинальні характеристики вуглецевих сорбентів, тим самим сприяючи ефективному видаленню нафтових забруднень.

3. Що стосується економічної ефективності застосування вуглецевих сорбентів, то їх внесення вважається кращим заходом, ніж поглинання нафтових забруднень звичайною тирсою. Відзначаємо, що вуглецеві сорбенти у 2,5-4,0 рази мають вищу нафтоємність, порівняно із вихідною сировиною. Це сприяє внесенню меншої кількості сорбенту у 3-4 рази за однієї і тої самої нафтопоглинальної ефективності, що є економічно й екологічно вигіднішим за застосування звичайної тирси різних порід дерев.

References

1. Shahzad, A., Siddiqui, S., Bano, A., Sattar, S., Hashmi, M. Z., Qin, M., & Shakoar, A. (2020). Hydrocarbon degradation in oily sludge by bacterial consortium assisted with alfalfa (*Medicago sativa* L.) and maize (*Zea mays* L.). *Arabian Journal of Geosciences*, 13, 1-12. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12517-020-05902-w>.
2. Karam, Q., & Al-Wazzan, Z. (2021). Toxicity of petroleum hydrocarbons to *Brachyuran* crabs: a review of deleterious effects of oil-related xenobiotics on life stages. *Journal of the Marine Biological Association of the United Kingdom*, 101(3), 561-576. DOI: <https://doi.org/10.1017/S0025315421000370>.
3. Mohammad, A. F., Mourad, A. A. I., Galiwango, E., Lwisa, E. G., Al-Marzouqi, A. H., El-Naas, M. H., ... & Al-Marzouqi, M. H. (2021). Effective and sustainable adsorbent materials for oil spill cleanup based on a multistage desalination process. *Journal of Environmental Management*, 299, 113652. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.113652>.
4. Плаксієв, Л. В. (2016). Методологія оцінювання поверхневих вод в місцях впливу об'єктів нафтопроводного транспорту. *Екологічна безпека та збалансоване ресурсокористування*, (2), 24-28. Режим доступу: http://nbuv.gov.ua/UJRN/ebzp_2016_2_5.
5. Cruz, J. M., Lopes, P. R. M., Montagnolli, R. N., Tamada, I. S., Silva, N. M., & Bidoia, E. D. (2013). Toxicity assessment of contaminated soil using seeds as bioindicators. *J Appl Biotechnol*, 1(1), 1-10. DOI: <http://dx.doi.org/10.5296/jab.v1i1.3408>.
6. Turner, N. R., Parkerton, T. F., & Renegar, D. A. (2021). Toxicity of two representative petroleum hydrocarbons, toluene and phenanthrene, to five Atlantic coral species. *Marine Pollution Bulletin*, 169, 112560. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2021.112560>.
7. Боднарчук Р. М., Вакевич М. М., Петросова В. І., Ніколайчук В. І., Гасинець Я. С. Вплив забруднення нафтопродуктами на мікробіоценоз ґрунту та фітотоксичний ефект в умовах Ужгородського району Закарпаття. (2017). *Науковий вісник Ужгородського університету. Серія Біологія*, Випуск 42 (2017): 86-93. URL: <https://cutt.ly/fwNelg60>

8. Soil pollution a risk to our health and food security. United Nations Environment Programme (UNEP), 2020. URL: <https://www.unep.org/news-and-stories/story/soil-pollution-risk-our-health-and-food-security>
9. Наконечний І. В., Літвак О. А., Літвак С. М., Маринець О. М. Аналіз чинників, що впливають на процес біоремедіації ґрунтів, забруднених нафтопродуктами (2023). *Екологічні науки* № 4(49). 114-122. DOI: <https://doi.org/10.32846/2306-9716/2023.eco.4-49.15>
10. Sayed, K., Baloo, L., & Sharma, N. K. (2021). Bioremediation of total petroleum hydrocarbons (TPH) by bioaugmentation and biostimulation in water with floating oil spill containment booms as bioreactor basin. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 18(5), 2226. DOI: <https://doi.org/10.3390/ijerph18052226>
11. 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. DOI: <http://dx.doi.org/10.15376/biores.14.4.8738-8752>
12. Шевчик-Костюк Л. З., Романюк О. І., Ощиповський І. В. Особливості забруднення ґрунтів нафтою та нафтопродуктами: огляд (2022). *Acta Biologica Ukrainica*. № 1. С. 32–40. DOI: <https://doi.org/10.26661/2410-0943-2022-1-04>
13. Meez, E., Hosseini-Bandegharai, A., Rahdar, A., Thysiadou, A., Matis, K. A., & Kyzas, G. Z. (2021). Synthetic oil-spills decontamination by using sawdust and activated carbon from aloe vera as absorbents. *Biointerface Res Appl Chem*, 11(4), 11778-11796. DOI: <https://doi.org/10.33263/BRIAC114.1177811796>
14. Ouyang, D., Lei, X., & Zheng, H. (2023). Recent Advances in Biomass-Based Materials for Oil Spill Cleanup. *Nanomaterials*, 13(3), 620. DOI: <https://doi.org/10.3390/nano13030620>
15. Головань Л. В., Бузіна І. М., Чуприна Ю. Ю. (2021). Екологічні методи відновлення земель, забруднених нафтопродуктами 60-63 <https://doi.org/10.30525/978-9934-26-047-6-16>
16. Khan, M. A. I., Biswas, B., Smith, E., Naidu, R., & Megharaj, M. (2018). Toxicity assessment of fresh and weathered petroleum hydrocarbons in contaminated soil-a review. *Chemosphere*, 212, 755-767. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2018.08.094>
17. Діюк В. Є. (2017). Вуглецеві сорбенти. Одержання, будова та властивості: навчальний посібник. Київ, ВПЦ «Київський університет». 143.
18. Kucher, L., Krasnoshtan, I., Nedilska, U., Muliarchuk, O., Manzii, O., Menderetsky, V., ... & Myronycheva, O. (2023). Heavy Metals in Soil and Plants During Revegetation of Coal Mine Spoil Tips and Surrounded Territories. *Journal of Ecological Engineering*, 24(7). DOI: <https://doi.org/10.12911/22998993/164756>
19. Шендрік Т. Г., Тамко В. О., Шевкопляс В. М., Бован Л. А., Циба М. М. Міцні вуглецеві сорбенти з композиційної сировини на основі вугілля та побічних продуктів коксохімії. Фізико-органічна хімія, фармакологія та фармацевтична технологія біологічно активних речовин: збірник наукових праць / За заг. ред. А. Ф. Попова. - Київ: КНУТД, 2021. - Вип. 3. - С. 224-236. URL: https://er.knutd.edu.ua/bitstream/123456789/19980/1/FOCh_2021_V3_P224-236.pdf
20. Beregniak, E., Beregniak, M., Myronycheva, O., Balabak, A., Belava, V., Boroday, V., ... & Voitsekhivskyi, V. (2023). Ecological Analysis of the Current State of Forest Resources in Forest Steppe of Ukraine. *Journal of Ecological Engineering*, 24(1), 87-96. DOI: <https://doi.org/10.12911/22998993/155951>
21. Калівошко О. М., Калівошко М. Ф. Техніко-страхова оцінка вуглецевих

- сорбентів на основі рослинної сировини для очищення нафтопродуктів. *Machinery&Energetics. Journal of Rural Production Research*. Kyiv. Ukraine. Vol. 12 (2) (2021). P. 83-88. DOI: <http://dx.doi.org/10.31548/machenergy2021.02>
22. Rogovskii, I. L., Kalivoshko, O. M., Voinash, S. A., ...Obukhova, I. A., Kebko, V. D. Research of absorbing properties of carbon sorbents for purification of aquatic environment from oil products .IOP Conference Series: *Earth and Environmental Science*, 2020, 548(6), DOI: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/548/6/062040>
 23. Забулонов Ю.Л., Пугач О.В., Кисельов Ю.В., Одукалець Л.А., Буртняк В.М. (2021). Відновлення водойм, забруднених нафтопродуктами за допомогою сорбенту розширеного графіту. *Геохімія техногенезу*. 33. DOI: <https://doi.org/10.15407/geotech2020.33.094>
 24. Glibovyt'ska, N. I., & Plak'siy, L. V. (2019). Ефективність поглинання нафти сорбентами природного та штучного походження. *Науковий вісник НЛТУ України*, 29(6), 76-78. DOI: <https://doi.org/10.15421/40290615>
 25. Бондаренко Л. Ю. Використання деревної біомаси як добрива для поліпшення ґрунтів у садах. V Всеукраїнська науково-практична конференція «Плодовий сад – новітнє в теорії та практиці» 18 червня 2021 року. Таврійський державний агротехнологічний університет імені Дмитра Моторного. 2021. С. 60-64. URL: <http://www.tsatu.edu.ua/tm/wp-content/uploads/sites/14/10.-vykorystannja-derevnoyi-biomasy-jak-dobryvo-dlja-polipshennja-hruntiv-u-sadah.pdf>.
 26. Літвак, С. М., & Літвак, О. А. (2023). Аналіз властивостей сорбентів для ліквідації розливів нафти на водних об'єктах. Режим доступу:<https://eir.nuos.edu.ua/handle/123456789/7325>.
 27. Сплодитель, А., Голубцов, О., Чумаченко, С., & Сорокіна, Л. (2023). Забруднення земель внаслідок агресії Росії проти України. Київ: ГО "Центр екологічних ініціатив «Екодія». URL: <https://ecoaction.org.ua/wp-content/uploads/2023/03/zabrudnennia-zemel-vid-rosii1.pdf>.
 28. Строкаль В. П., Бережняк Є. М., Наумовська О. І., Вагалюк Л. В., Ладика М. М., Сербенюк Г. А., Паламарчук С. П., Павлюк С. Д. Вплив російської агресії на стан природних ресурсів України: монографія // За заг. ред. В. П. Строкаль. К., Вид. центр НУБіП України, 2023. 218 с. <https://dglb.nubip.edu.ua/items/4d10546> <https://dglb.nubip.edu.ua/items/4d10546d-6fb3-4ebf-b29a-75f0335d008d>.
 29. Makarenko, N. A., Strokal, V. P., Berezhniak, Y. M., Bondar, V. I., Pavliuk, S. D., Vagaliuk, L. V., ... & Kovpak, A. V. (2022). Вплив російської воєнної агресії на природні ресурси України: аналіз ситуації, методологія оцінювання. *Наукові доповіді НУБіП України*, (4 (98)). URL: <http://dx.doi.org/10.31548/dopovid2022.04.003>.
 30. Калівошко О. М., Калівошко М. Ф. Техніко-економічна оцінка тирси різних порід дерев як сорбентів для очищення нафтопродуктів. *Machinery& Energetics. Journal of Rural Production Research*. Kyiv. Ukraine. 2021, Vol. 12 (3) (2021). P. 137-142. DOI: <http://dx.doi.org/10.31548/machenergy2021.02>.
 31. Назаренко, С. К., & Архипова, Л. М. (2016). Сучасні методи ліквідації аварійних розливів нафти на водних об'єктах суходолу. *Науковий вісник Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу*, (1), 72-79. Режим доступу: http://nbuv.gov.ua/UJRN/Nvif_2016_1_9.
 32. Калівошко О. М., Калівошко М. Ф. Техніко-економічне обґрунтування ефективності вуглецевих сорбентів на основі тирси сосни для очищення нафтопродуктів. *Machinery & Energetics*.

- Journal of Rural Production Research. Kyiv. Ukraine. Vol. 13 (1) (2022). P. 49-53. DOI: [https://doi.org/10.31548/machenergy.13\(1\).2022.49-53](https://doi.org/10.31548/machenergy.13(1).2022.49-53).*
33. Будзуляк І. М., Вашинський В. М., Рочій Б. І. Адсорбційні властивості вуглецевих матеріалів, отриманих методом хімічної активності. ДВНЗ. Прикарпатський національний університет ім. Василя Стефаника. 2015. Т.13, №1. С. 84-90. URL: <http://dspace.nbuv.gov.ua/bitstream/handle/123456789/108647/12-Budzu-lyakNEW.pdf?sequence=1>.
34. Галиш, В. В., Дикуну, І. М., Трус, І. М., Радовенчик, В. М., & Гомеля, М. Д. (2022). Вуглецеві сорбенти з пероцтового лігніну. Вісник НТУУ “КПІ імені Ігоря Сікорського”. Серія: Хімічна інженерія, екологія та ресурсозбереження, (3), 69–76. DOI: <https://doi.org/10.20535/2617-9741.3.2022.265362>.

Kalivoshko O., Naumovska O., Berezhnyak E., Palamarchuk S., Pavlyuk S. (2024) ECOLOGICAL AND ECONOMIC JUSTIFICATION OF THE EFFICIENCY OF CARBON SORBENTS BASED ON SAWWOOD OF DIFFERENT TREES

BIOLOGICAL SYSTEMS: THEORY AND INNOVATION, 15(2): 28-40.

<https://journals.nubip.edu.ua/index.php/Biologiya/article/view/49739>

[http://dx.doi.org/10.31548/biologiya15\(2\).2024.003](http://dx.doi.org/10.31548/biologiya15(2).2024.003)

Abstract. *The paper analyzes the effectiveness of the use of carbon sorbents based on sawdust of various tree species in decontamination of fuel and lubricants. The advantages of using the sorption method as an effective, widespread, simple and affordable measure for cleaning oil products are substantiated. Attention is focused on the quality of the sorbent material for the use of carbon sorbents from sawdust of various tree species. The structural, physico-chemical, absorption and sorption characteristics of carbon sorbents from vegetable raw materials are given and the effectiveness of their use for cleaning water and soil environments is shown. The ecological and economic advantages of cleaning the water and soil environment from oil products with carbon sorbents from plant raw materials, compared to other cleaning methods and means, are revealed. The purpose of the work was to analyze the effectiveness of carbon sorbents from sawdust of various tree species in the fight against oil pollution. Research methods are generally accepted.*

It was established that sawdust of pine and hornbeam has a large oil capacity and sorption capacity, which is 2.1-2.5 times higher, compared to carbon sorbents from sawdust of other species of trees, thanks to which it can be effectively used in decontamination of oil spills. Thermal treatment of sawdust activates its sorption capacity and oil capacity by 2.3-4.1 times, which indicates its ecological efficiency in the adsorption of fuel and lubricant materials. The optimal temperature of sawdust carbonization is within 250-300°C, and the duration is 9.0-10.5 minutes. We also note the economic efficiency of the introduction of carbon sorbents in 2.5-4.0 times, compared to the use of ordinary sawdust.

Key words: *petroleum products, carbon sorbents, sawdust, carbonization, destruction of polymer chains, oil capacity, energy costs.*