

## ОЦІНКА ЕФЕКТИВНОСТІ ВИКОРИСТАННЯ ВІДХОДІВ БІОЕНЕРГЕТИЧНИХ ВИРОБНИЦТВ ДЛЯ ВІДНОВЛЕННЯ ҐРУНТІВ, ЗАБРУДНЕНИХ ДИЗЕЛЬНИМ ПАЛИВОМ

Черняк Л.М.<sup>1</sup>, Манєцкі Томаш<sup>2</sup>, Чешельські Радослав<sup>2</sup>, Дмитруха Т.І.<sup>1</sup>,  
Мельниченко В.В.<sup>3</sup>, Олександр Штика<sup>2</sup>, Фролов В.Ф.<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Національний університет «Київський авіаційний інститут»  
пр. Любомира Гузара, 1, 03058, м. Київ

<sup>2</sup>Лодзинський технологічний університет  
вул. Стефана Жеромського, 114, 90-543 м. Лодзь, Польща

<sup>3</sup>ТОВ «НВП «Екозахист»  
вул. Деміївська, 18 к.3, 03039, м. Київ

<sup>4</sup>Державна наукова установа «Інститут екологічного відновлення та розвитку України»  
вул. Митрополита Василя Липківського, 35, 03035, Київ  
[larysa.cherniak@npp.kai.edu.ua](mailto:larysa.cherniak@npp.kai.edu.ua)

У статті досліджено ефективність використання відходів виробництва біоенергії (дигестату) для рекультивації ґрунтів, забруднених дизельним паливом. Для дослідження було відібрано зразки ґрунту з рівнем забруднення дизельним паливом 10 ОДК та з різним вмістом дигестату для оцінки його впливу на процеси відновлення ґрунту.

Як ключові індикатори відновлення використовували зміни показника рН та активності ферменту поліфенолоксидази, який є важливим маркером біохімічної активності ґрунту та його здатності до детоксикації органічних забруднювачів. Спостереження проводили в динаміці протягом 10 діб, що дозволило простежити ранні стадії процесу самовідновлення ґрунту.

Результати показали, що внесення дигестату сприяє стабілізації рН середовища та створює більш сприятливі умови для розвитку мікробіоценозу. Найвищу активність поліфенолоксидази та найінтенсивніше відновлення біохімічних процесів зафіксовано на десяту добу експерименту при внесенні 15% дигестату у ґрунт.

Отримані результати підтверджують, що дигестат може виступати ефективним органо-мінеральним агентом для відновлення деградованих ґрунтів. Його застосування не лише сприяє зменшенню концентрації нафтопродуктів, але й активує природні механізми самоочищення екосистеми. Особливо підкреслюється значення таких підходів у контексті циркулярної економіки, оскільки відходи біоенергетичного виробництва повторно залучаються у господарський обіг замість утилізації.

Використання дигестату є перспективним напрямом екологічної рекультивації, що поєднує вирішення проблеми утилізації відходів і відновлення забруднених земель. Подальші дослідження доцільно спрямувати на довгострокову оцінку стабільності відновлених ґрунтів та вплив різних типів органічних відходів на процеси біодеградації нафтопродуктів. *Ключові слова:* нафтопродукти, відновлення ґрунтів, дигестат, поліфенолоксидаза.

**Assessment of the efficiency of using bioenergy production waste for the remediation of diesel-contaminated soils. Cherniak L., Maniecki T., Ciesielski R., Dmytrukha T., Melnychenko V., Shtyka O., Frolov V.**

The article investigates the effectiveness of using bioenergy production waste (digestate) for the remediation of soils contaminated with diesel fuel. Soil samples with a diesel fuel contamination level of 10 OEC and with different digestate contents were selected for the study to assess its impact on soil restoration processes.

The key restoration indicators used were changes in pH and the activity of the polyphenol oxidase enzyme, which is an important marker of the biochemical activity of the soil and its ability to detoxify organic pollutants. Observations were carried out over a period of 10 days, which allowed us to trace the early stages of the soil self-restoration process.

The results showed that the introduction of digestate helps stabilize the pH of the environment and creates more favorable conditions for the development of microbiocenosis. The highest activity of polyphenol oxidase and the most intensive restoration of biochemical processes were recorded on the tenth day of the experiment when 15% digestate was added to the soil.

The results obtained confirm that digestate can act as an effective organo-mineral agent for the restoration of degraded soils. Its use not only contributes to the reduction of the concentration of petroleum products, but also activates the natural mechanisms of self-cleaning of the ecosystem. The importance of such approaches in the context of a circular economy is particularly emphasized, since waste from bioenergy production is re-involved in economic circulation instead of disposal.

The use of digestate is a promising direction of ecological remediation, combining the solution of the problem of waste disposal and the restoration of contaminated lands. Further research should be directed to the long-term assessment of the stability of restored soils and the impact of different types of organic waste on the processes of biodegradation of petroleum products. *Key words:* petroleum products, soil remediation, digestate, polyphenol oxidase.



**Постановка проблеми.** Забруднення ґрунтів нафтою та нафтопродуктами є однією з найактуальніших екологічних проблем сучасності [1, 2]. Основними джерелами надходження вуглеводнів у ґрунтовий покрив є техногенні фактори, пов'язані з процесами видобування, транспортування, зберігання та переробки нафти. Значні обсяги нафтопродуктів потрапляють у ґрунт унаслідок аварійних розливів, використання паливно-мастильних матеріалів у промисловості й транспорті, розгерметизації трубопроводів, витоків із резервуарів, пошкодження технологічного обладнання, а також у складі виробничих і побутових стічних вод [3]. Тому, важливим науково-практичним завданням є пошук екологічно безпечних та доступних засобів та методів відновлення порушених внаслідок забруднення нафтопродуктами ґрунтів.

**Актуальність.** Забруднення ґрунтів нафтопродуктами призводить до порушення ґрунтових екосистем та призводить зниження їх здатності до самовідновлення. Найбільш небезпечними для ґрунтів є смолисто-асфальтенові компоненти нафти, які характеризуються високою хімічною стійкістю та здатністю швидко адсорбуватися ґрунтовими частинками [4, 5]. Вони утворюють гідрофобні плівки на поверхні ґрунту, що призводить до порушення фізико-хімічних властивостей, зниження повітрообміну та водопроникності, пригнічення діяльності аборигенних мікроорганізмів. Унаслідок цього відбувається ущільнення та так зване «цементування» ґрунтової маси, що негативно впливає на ріст і розвиток рослин, а також спричиняє зміну фізико-хімічних і біологічних показників ґрунту. Високі концентрації смолисто-асфальтенових речовин практично унеможливають процеси природного самоочищення та відновлення забруднених ґрунтів.

Одним із суттєвих антропогенних чинників деградації ґрунтів є надходження дизельного палива під час виконання сільськогосподарських, транспортних робіт та військових дій [6]. Дизельне паливо містить комплекс токсичних органічних сполук — насичені й ароматичні вуглеводні, смолисто-асфальтенові речовини та сірковмісні компоненти, які відзначаються високою стійкістю у природному середовищі. Потрапляючи в ґрунт, ці речовини порушують водно-повітряний режим, структуру та пористість, погіршують фізико-хімічні, агрофізичні й біохімічні властивості. Одночасно спостерігається пригнічення ґрунтової мікрофлори, що відіграє ключову роль у процесах природної ремедіації. Легкі фракції нафтопродуктів частково випаровуються, однак важкі компоненти тривалий час зберігаються в ґрунті, адсорбуються його частинками та поступово мігрують у глибші горизонти, формуючи осередки довготривалого забруднення.

Як показали дослідження [7, 8, 9] серед інших відомих способів відновлення ґрунту, використання дигестату, в контексті залучення відходів для біоенергетичних цілей з виробництва біогазу та в агро-

екологічних цілях шляхом використання дигестату як біодобрива є перспективним напрямом дослідження в контексті реалізації засад циркулярної економіки при функціонуванні агропромислових комплексів. Проте, питання науково обґрунтованого підбору кількості дигестату, у якості добрива при різних концентраціях дизельного палива у ґрунті, залишається недостатньо дослідженим і потребує подальшого вивчення.

**Зв'язок автора доробку із важливими науковими та практичними завданнями.** З урахуванням актуальності проблеми забруднення ґрунтів нафтопродуктами при виконанні сільськогосподарських робіт, було проаналізовано перспективи використання відходів біоенергетичних виробництв у якості добрив та визначено напрямки подальшого практичної ролі дигестату для відновлення порушених впливом дизельного палива ґрунтів та реалізації засад циркулярної економіки при використанні при функціонуванні агропромислових комплексів.

У роботі було експериментально досліджено залежність кислотності ґрунту та кислотність поліфенолоксидазної активності ґрунту з різним рівнем забруднення дизельним паливом, від кількості дигестату доданого до ґрунту.

У сучасних умовах для відновлення ґрунтів, забруднених нафтою та нафтопродуктами, широко застосовують біологічні методи ремедіації, зокрема використання дигестату. Дигестат — це комплексний біологічний продукт, що утворюється внаслідок анаеробного розкладання органічної сировини. Він містить активні мікроорганізми, ферменти та органічні сполуки, які забезпечують інтенсивну біологічну трансформацію токсичних речовин, у тому числі вуглеводнів нафти та сприяють відновленню фізико-хімічних, агроекологічних і біологічних властивостей ґрунту. Застосування дигестату покращує структуру та пористість ґрунтового покриву, активізує природні процеси самоочищення й самовідновлення.

Ефективність дигестату зумовлена його унікальним складом, що включає комплекс мікроорганізмів і ферментів, які діють узгоджено та взаємно підсилюють один одного. У його складі наявні бактерії та гриби-деструктори, а також ферменти, що каталізують біологічну деградацію нафтопродуктів. Зокрема, оксидази та гідролази беруть участь у розщепленні важких вуглеводнів, а пероксидази — в окисненні складних органічних сполук. У результаті відбувається інтенсифікація процесів біодеградації нафтових забруднювачів і зниження їх токсичності.

Тривале застосування дигестату сприяє покращенню структурного стану ґрунту, підвищенню його водопроникності, аерації та біологічної активності, а також розвитку корисної мікрофлори. Мікроорганізми дигестату здійснюють біотрансформацію вуглеводнів, включаючи ароматичні та

поліциклічні сполуки, які є найбільш стійкими до розкладання. У процесі біохімічних перетворень ці речовини окиснюються та мінералізуються до простих неорганічних продуктів – вуглекислого газу, води та мінеральних солей.

**Виділення невирішених раніше частин загальної проблеми, котрим присвячується означена стаття.** Незважаючи на наявність значної кількості досліджень та публікацій стосовно відновлення ґрунтів від забруднення нафтопродуктами, питання використання відходів біоенергетичних виробництв для відновлення порушених ґрунтів залишається недостатньо вивченим. Бракує практичних рекомендацій щодо оптимальної кількості дигестату у ґрунті, здатного ефективно відновлювати ґрунт, забруднений дизельним паливом.

**Новизна.** Новизна даної роботи полягає у визначенні впливу додавання дигестату на здатність ґрунту, забрудненого дизельним паливом, до самовідновлення. А також у розробці рекомендацій щодо використання відходів біоенергетичних виробництв, використання яких дозволить вирішити питання відновлення ґрунтів забруднених дизельним паливом.

**Методологічне або загальнонаукове значення.** Дослідження потенціалу дигестату при застосуванні у технологіях відновлення ґрунтів, забруднених нафтопродуктами має важливе значення для забезпечення стійкого розвитку агропромислових комплексів. Зокрема через застосування принципів циркулярної економіки при використанні відходів власних біоенергетичних виробництв для відновлення ґрунтів, порушених впливом дизельного палива. Отримані результати можуть стати основою для розробки та впровадження рекомендацій та рішень щодо підвищення рівня екологічної безпеки ґрунтів даних підприємств.

**Виклад основного матеріалу.** Важливим показником стану ґрунту в процесі його відновлення є кислотність (рН) [10], яка визначає характер хімічних процесів і активність мікроорганізмів-деструкторів. Більшість мікроорганізмів, що окиснюють нафтові вуглеводні, проявляють максимальну активність у слабкокислому або нейтральному середовищі (рН 6,5–7,5). За умов підвищеної кислотності або лужності їхня активність різко знижується, що призводить до уповільнення процесів біодеградації.

Встановлено, що важливою умовою ефективної біодеградації нафти є забезпеченість ґрунту доступними формами елементів мінерального живлення. Відомо, що у кислих ґрунтах фосфор переходить у малодоступні сполуки, що обмежує мінеральне живлення мікроорганізмів і, відповідно, сповільнює процеси розкладання вуглеводнів.

В умовах забруднення ґрунтів нафтою та нафтопродуктами активність поліфенолоксидази, як правило, знижується через токсичний вплив вуглеводнів на мікробну спільноту. Під час біоремедіації застосування біопрепаратів і мінеральних добрив

сприяє відновленню ферментативної активності ґрунту [11].

В процесі відновлення забруднених ґрунтів спостерігається поступове підвищення активності поліфенолоксидази, що свідчить про присутність значної кількості функціонально активних мікроорганізмів та відновлення процесів біоремедіації.

#### **Матеріали та методи дослідження**

##### *1. Підготовка ґрунтових зразків.*

Для проведення експерименту використовували ґрунт, який попередньо доводили до повітряно-сухого стану, подрібнювали та просіювали. Після цього зразки зважували та розподіляли у чашки Петрі рівними наважками.

Було сформовано наступні зразки ґрунту для дослідження:

- контроль (ґрунт без додавання дигестату);
- ґрунт + 10% дигестату;
- ґрунт + 15% дигестату;
- ґрунт + 20% дигестату;
- ґрунт, забруднений паливом (10 ОДК), + 10% дигестату;
- ґрунт, забруднений паливом (10 ОДК), + 15% дигестату;
- ґрунт, забруднений паливом (10 ОДК), + 20% дигестату.

Дигестат вносили у відсотковому співвідношенні до маси ґрунту. Забруднення паливом моделювали шляхом внесення полютанту до рівня 10 ОДК.

##### *Визначення кислотності (рН)*

Визначення рН ґрунту проводили потенціометричним методом у водній витяжці відповідно до міжнародного стандарту ISO 10390:2021.

Згідно з методикою, наважку ґрунту масою 10 г поміщали у конічну колбу об'ємом 250 мл та додавали 50 мл дистильованої води (співвідношення ґрунт : вода – 1:5). Отриману суспензію інтенсивно перемішували протягом 5 хвилин і фільтрували через складчастий паперовий фільтр до отримання прозорого фільтрату.

Визначення рН здійснювали за допомогою каліброваного рН-метра зі скляним електродом.

Метод ґрунтується на вимірюванні рН у водній суспензії зі співвідношенням 1:5, що є стандартним підходом для різних типів ґрунтів .

Результати вимірювань заносили до таблиці 1. Дослідження проводили у динаміці: на 1-й (початковий стан), 10-й та 20-й день експерименту.

##### *2. Визначення поліфенолоксидазної активності ґрунту.*

Поліфенолоксидазну активність ґрунту визначали як показник біохімічної активності та інтенсивності окисно-відновних процесів у ґрунтового середовищі. Дослідження проводили для всіх варіантів зразків перед початком експерименту (1-й день), а також у динаміці – на 10-й та 20-й день.

Визначення поліфенолоксидазної активності здійснювали спектрофотометричним методом за

швидкістю окиснення фенольного субстрату з утворенням забарвлених продуктів реакції. Для цього наважку ґрунту інкубували з відповідним субстратом у буферному розчині за контрольованих умов, після чого вимірювали оптичну густина розчину за допомогою спектрофотометра.

Активність ферменту виражали у відносних одиницях або в мг окисненого субстрату на 1 г ґрунту за одиницю часу.

Методика визначення ґрунтових оксидаз відповідає загальноприйнятим підходам до оцінки ферментативної активності ґрунтів, описаним у міжнародних рекомендаціях з аналізу біологічних властивостей ґрунту (ISO 20130:2018).

Отримані результати представлені на графіках 1-2.

Поступове зниження кислотності ґрунту (тобто підвищення значення рН) у незабруднених паливом зразках на 10-ту та 20-ту добу, порівняно з контролем, ймовірно зумовлене активізацією мікробіологічних процесів та мінералізацією органічної речовини. У процесі розкладу органічних компонентів, зокрема за участю ґрунтової мікробіоти, відбувається утворення сполук лужного характеру (наприклад, амонійних форм азоту), що сприяє нейтралізації кислотності ґрунтового середовища. Крім того, можливим фактором є буферна здатність ґрунту, яка проявляється у стабілізації реакції середовища за рахунок катіонного обміну та зв'язування водневих іонів.

Водночас встановлено, що забруднення ґрунту дизельним паливом (ДП) у концентрації 10 ОДК не спричинило суттєвих змін кислотності. Це може свідчити про те, що вказаний рівень забруднення є недостатнім для істотного порушення кисло-лужної рівноваги ґрунтової системи, або ж вплив

вуглеводнів дизельного палива має переважно фізико-хімічний характер (наприклад, гідрофобізація частинок ґрунту), без значного утворення кислотних або лужних продуктів трансформації на початкових етапах експерименту.

Виятком є варіант із внесенням 20% дигестату, де зафіксовано підвищення кислотності (зниження рН) порівняно з аналогічним зразком без дизельного палива. Це явище можна пояснити інтенсифікацією біохімічних процесів за рахунок додаткового надходження легкодоступних органічних речовин та мікроорганізмів із дигестату. У процесі їх розкладу можуть утворюватися органічні кислоти (наприклад, оцтова, масляна), що тимчасово знижує рН середовища. Крім того, взаємодія компонентів дигестату з вуглеводнями дизельного палива може змінювати напрям мікробіологічних процесів у бік кислотогенезу.

Таким чином, отримані результати свідчать про складний характер впливу як органічних добрив (дигестату), так і нафтопродуктів на кисло-лужний стан ґрунту, який визначається балансом мікробіологічних і фізико-хімічних процесів у системі.

Аналізуючи результати експериментальних досліджень, представлені на рис. 2, можемо зробити наступні висновки. Зростання поліфенолоксидазної активності на 10-ту добу для всіх зразків ґрунту свідчить про швидку реакцію ґрунтової мікробіоти на зміну умов середовища. Поліфенолоксидази беруть участь у процесах окиснення фенольних сполук і є важливими індикаторами інтенсивності гуміфікації та трансформації органічної речовини. Підвищення їх активності, ймовірно, пов'язане з надходженням доступних органічних субстратів (зокрема з дигестату) та адаптацією мікроорганізмів до присутності вуглеводнів дизельного палива, що

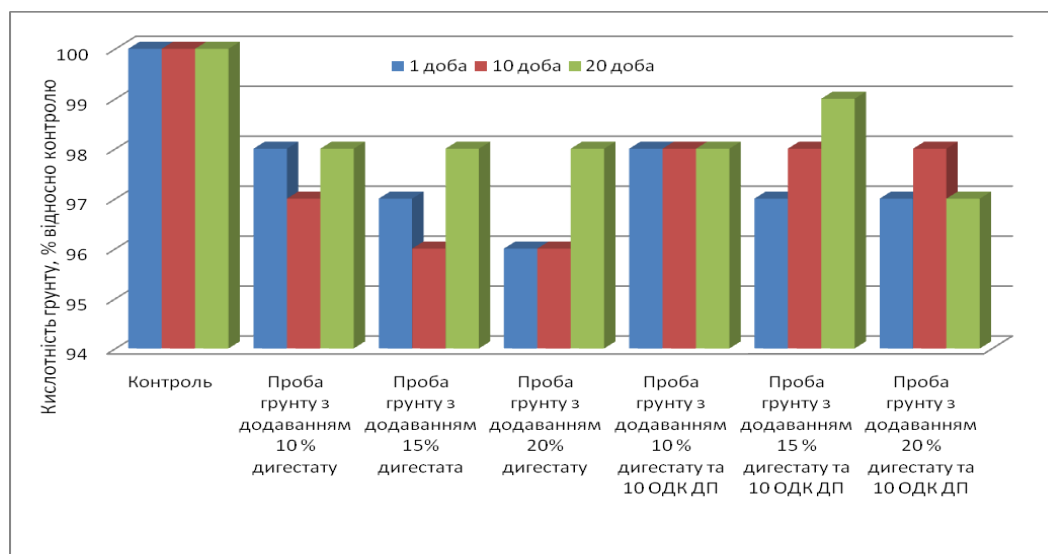


Рис. 1. Залежність кислотності ґрунту від вмісту дигестату

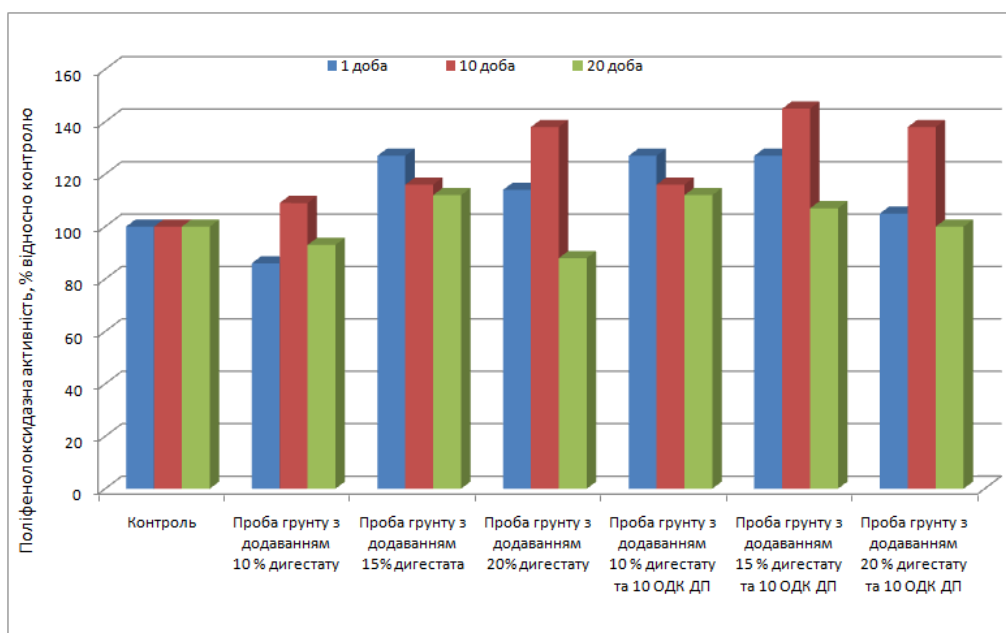


Рис. 2. Залежність поліфенолоксидазної активності ґрунту від вмісту дигестату

стимулює ферментативні процеси окиснювального типу.

Найвище значення ферментативної активності у варіанті з внесенням 15% дигестату та забрудненням 10 ОДК ДП можна пояснити синергетичним ефектом. З одного боку, дигестат є джерелом легкодоступних поживних речовин, мікроелементів і активної мікробіоти, що стимулює розвиток ферментативної системи ґрунту. З іншого боку, наявність дизельного палива у помірній концентрації може виступати як індуктор окиснювальних ферментів, оскільки мікроорганізми активізують механізми детоксикації та біодеградації вуглеводнів. У результаті відбувається підсилення активності поліфенолоксидаз.

Зниження поліфенолоксидазної активності на 20-ту добу для більшості зразків ґрунту може бути зумовлене виснаженням легкодоступних субстратів, накопиченням проміжних продуктів метаболізму або частковим пригніченням мікробіоти внаслідок тривалого впливу забруднювача. Крім того, після початкової фази активізації мікробних процесів система переходить у більш стабілізований стан, що супроводжується зниженням інтенсивності ферментативної активності.

Виняток становить варіант із додаванням 10% дигестату, де активність ферменту не знижується. Це може бути пов'язано з оптимальним співвідношенням поживних речовин і відсутністю надлишкового органічного навантаження, що забезпечує більш тривале підтримання мікробіологічної активності. Така доза дигестату, ймовірно, створює сприятливі умови для функціонування мікробних угруповань без розвитку інгібуючих

ефектів, що спостерігаються при вищих концентраціях.

Отже, отримані результати демонструють, що поліфенолоксидазна активність ґрунту визначається балансом між наявністю органічних субстратів, рівнем техногенного навантаження та адаптаційними можливостями ґрунтової мікробіоти, а внесення дигестату може як стимулювати, так і стабілізувати ферментативні процеси залежно від його концентрації.

**Висновки.** У роботі експериментально підтверджено ефективність використання відходів біоенергетичного виробництва (дигестату) для відновлення ґрунтів, забруднених дизельним паливом, на рівні 10 ОДК.

Встановлено, що внесення дигестату суттєво впливає на фізико-хімічні та біохімічні властивості ґрунту, зокрема на значення рН та активність поліфенолоксидази, які є показниками процесів відновлення.

Доведено, що використання дигестату сприяє підвищенню здатності ґрунту до самовідновлення, активуючи біохімічні процеси в забрудненому середовищі.

Визначено оптимальний вміст дигестату – 15% від маси ґрунту, при якому спостерігається максимальний ефект відновлення, особливо на 10-й день експерименту.

Отримані результати підтверджують доцільність використання дигестату як ефективного та екологічно безпечного засобу ремедіації ґрунтів у рамках принципів циркулярної економіки, що сприяє підвищенню рівня екологічної безпеки та сталому управлінню ґрунтовими ресурсами.

## Література

1. Босюк А. С., Шестопапов О. В., Разно М. Р. Біоіндикація як метод визначення якості ґрунту та впливу забруднювачів. *Екологічні науки*. – 2024. – №2(53). – С. 84–89.
2. Романюк, О. І.; Шевчик, Л. З.; Жак, Т. В. Зміна кількості нафти та динаміка фітотоксичності ґрунту при нафтовому забрудненні. *Екологічна безпека та збалансоване ресурсокористування*. 2018, 2(18), 7-14. doi:10.31471/2415-3184-2018-2(18)-7-14.
3. Бабаджанова О.Ф., Сукач Ю.Г., Сукач Р.Ю. Фітотоксичність ґрунтів, забруднених дизельним паливом. *Науковий вісник Національного лісотехнічного університету України*. 2017. № 3. С. 92–94.
4. Аблесва І. Ю., Пляцук Л. Д. Фізико-хімічні закономірності забруднення ґрунту вуглеводневими фракціями нафти. *Науково-практичний журнал «Екологічні науки»*. 2017. № 18–19. С. 35–42.
5. Ірина Аблесва, Леонід Пляцук Системний підхід до підвищення екологічної безпеки нафтовидобувних територій *Монографія Сумський державний університет*. 2021. 274 с.
6. Бондар Т. О., Шестопапов О. В., Босюк А. С. [та ін.] Біоремедіаційне відновлення нафтозабруднених ґрунтів: експериментальне дослідження *Екологічні науки*. – 2025. – № 5 (62), ч. 1. – С. 181-188.
7. Paramonov, A., Ablicieva, I., Vaskina, I., Lysytska, A., & Makarenko, N. (2024). The efficiency of organic pollutants degradation in the process of anaerobic digestion of feedstocks with different origin. *Ecological Safety and Balanced Use of Resources*, 15(1), 24-38. doi: 10.69628/esbur/1.2024.24.
8. Ablicieva I. Theoretical substantiation of the petroleum hydrocarbons destruction by specific microflora using anaerobic digestate. *Environmental problems*. 2020. Vol. 5, No. 4. P. 191–201. <https://doi.org/10.23939/ep2020.04.191>
9. Шевчик-Костюк, Л. З., Романюк, О. І., & Ощиповський, І. В. (2022). Особливості забруднення ґрунтів нафтою та нафтопродуктами: огляд. *Acta Biologica Ukrainica*, (1), 32-40. <https://doi.org/10.26661/2410-0943-2022-1-04>.
10. Коляда О.В., Коробкова Г.В., Коляда В.П. Аналіз та моделювання фітотоксичності чорноземного ґрунту забрудненого нафтопродуктами. *Український журнал природничих наук* № 12 с. 371 – 378 2025.
11. Легостаєва Т.В. Вплив важких металів на активність оксидоредуктазних ферментів ґрунту (модельний експеримент) *Вісник Дніпропетровського університету. Біологія. Екологія*. – 2009. – Вип. 17, т. 1. – С. 111–114.

Дата першого надходження статті до видання: 30.04.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 21.05.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 30.05.2026