

DOI: <https://doi.org/10.32782/2308-1988/2024-49-56>

УДК 620.92.002.68; 620.92.004.8

Панцирева Ганна Віталіївна

кандидат сільськогосподарських наук,
доцент кафедри лісового та садово-паркового господарства,
Вінницький національний аграрний університет
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0539-5211>

Hanna Pantsyрева

Vinnitsia National Agrarian University

**ЕКОЛОГО-ЕКОНОМІЧНІ АСПЕКТИ РЕЦИКЛІНГУ ДИГЕСТАТУ
НА ЗАСАДАХ СТАЛОГО РОЗВИТКУ ТА ПІДВИЩЕННЯ
РОДЮЧОСТІ ҐРУНТУ****ENVIRONMENTAL AND ECONOMIC ASPECTS OF DIGESTED
RECYCLING ON THE BASIS OF SUSTAINABLE DEVELOPMENT
AND INCREASE OF SOIL FERTILITY**

Анотація. Мета статті полягає у дослідженні еколого-економічних аспектів виробництва дигестату на засадах сталого розвитку та підвищення родючості ґрунту. Науковою основою дослідження є фундаментальні положення розробки зональних технологічних прийомів вирощування сільськогосподарських культур. Дослідження проведені в рамках виконання прикладного дослідження на тему: «Розробка біоорганічних технологій вирощування сільськогосподарських культур для виробництва біопалив і забезпечення енерго-незалежності АПК» (номер державної реєстрації 0123U100311) дозволили розробити ефективні регламенти застосування різних варіантів біудобрення сільськогосподарських культур за схемами ґрунтового та позакореневого їх застосування або ж у варіантах комбінованого використання. Авторами охарактеризовано світову тенденцію глобального потепління, зміни клімату, що характеризується підвищенням температурних режимів і зменшенням кількості опадів, з року в рік призводять до деградації ґрунтів – ерозій, забруднення, підкислення і засолення. Простежено, суттєву деградацію українських земель сільськогосподарського призначення. Проаналізовано рециклінг органічних матеріалів у ґрунт, який вважається у більшості випадків найкращим екологічним підходом, що дає змогу замикати колообіги природних поживних речовин та вуглецю. Представлено розрахунки вмісту основних елементів живлення та вартості виробництва біодобрив. Зважаючи на зазначене, необхідність подальших досліджень полягає в удосконаленні механізму державного стимулювання реалізації державно-приватного партнерства щодо впровадження безвідходних технологій для виробництва дигестату, як ефективного органічного добрива.

Ключові слова: дигестат, рециклінг, ґрунтозбереження, ресурсозбереження, безвідходні технології, сільськогосподарські культури, приріст врожаю.

Summary. The purpose of the article is to study the ecological and economic aspects of digestate production on the basis of sustainable development and increasing soil fertility. The scientific basis of the study is the fundamental provisions of the development of zonal technological methods of growing agricultural crops. The research conducted as part of the applied research on the topic: "Development of organic technologies for growing agricultural crops for the production of biofuels and ensuring the energy independence of the agricultural sector" (state registration number 0123U100311) allowed to develop effective regulations for the use of various options for biofertilization of agricultural crops according to the schemes of soil and foliar application or in variants of combined use. The authors characterized the world trend of global warming, climate change, which is characterized by an increase in temperature regimes and a decrease in the amount of precipitation, which from year to year leads to soil degradation – erosion, pollution, acidification and salinization. A significant degradation of Ukrainian agricultural lands has been observed. The recycling of organic materials into the soil is analyzed, which is considered in most cases to be the best ecological approach, which makes it possible to close the cycles of natural nutrients and carbon. Calculations of the content of the main nutrients and the cost of production of biofertilizers are presented. Taking into account the above, the need for further research is to improve the mechanism of state stimulation of the implementation of public-private partnership regarding the introduction of waste-free technologies for the production of digestate as an effective organic fertilizer.

Keywords: digestate, recycling, soil conservation, resource conservation, waste-free technologies, agricultural crops, crop growth.

Постановка проблеми. Земельні ресурси України деградує надто високими темпами. Втрати родючого шару ґрунту сягають 600 млн. тонн за рік, зокрема, гумусу – до 20 млн. тонн. Зважаючи на це, лише для простого відтворення родючості ґрунтів необхідно щорічно вносити 8-10 тонн органічних добрив на гектар посівної площі. Разом з тим, реальні цифри внесення органічних добрив дуже далекі від необхідних. У зв'язку з цим виникає необхідність популяризації даного виду добрив для вирішення проблеми збереження і навіть поліпшення родючості. Як наслідок, ґрунт без органічних речовин виснажується, що призводить до зменшення рівня врожайності сільськогосподарських культур. Наразі дана тенденція сприяє розвитку дисбалансу, так званого гумусового голоду. За цих умов вкрай важливо еколого-економічні аспекти впровадження біоорганічних технологій вирощування сільськогосподарських культур на основі внесення дигестату для забезпечення продовольчої безпеки держави на засадах сталого розвитку та підвищення родючості ґрунту [1; 8].

В Україні як органічні добрива, окрім традиційно використовуваних гною та посліду, виробляються похідні органічні добрива на їх основі, а також продукти на основі торфу та сапропелів. Окремо можна виокремити добрива на основі природного мінералоїду – леонардиту. З появою біогазових установок можна виокремити також органічне добриво з дигестату та похідних продуктів з нього [3; 5; 10].

Дигестат містить ряд поживних речовин, таких як: азот: 2,3-4,2 кг/т, фосфор: 0,2-1,5 кг/т, калій: 1,3-5,2 кг/т, ряд мезо- і мікроелементів, що грають істотну роль в розвитку культур (Ca, Mg, Mn, V, Fe). Окрім цього, дигестат містить органічний вуглець, у тому числі в складі гумінових речовин (1-3% по масі), має високу частку доступного для рослин азоту (до + 10...70% у порівнянні з не збродженими матеріалами), оптимальне для ґрунту співвідношення C:N, оптимальне для ґрунту значення показника рН 6,8-7,5, містить активні популяції бактерій, що сприяють розпаду органіки в ґрунті [2].

Обґрунтована біоорганічна технологія вирощування сільськогосподарських культур в екологічній сфері має виключити нераціональне використання природних ресурсів та негативний вплив на навколишнє природне середовище, що, у свою чергу, стимулюватиме відтворенню природно-ресурсного потенціалу країни та вирішенню глобальних екологічних проблем. На основі розробки технологічних аспектів необхідно розробити ефективні регламенти застосування різних варіантів біоудобрення сільськогосподарських культур за схемами ґрунтового та позакореневого їх застосування або ж у варіантах комбінованого використання.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Питаннями розробки біоорганічних технологій вирощування сільськогосподарських культур для забезпечення продовольчої безпеки держави на засадах сталого розвитку та підвищення родючості ґрунту та їх вирішення шляхом раціонального використання природних ресурсів, забезпечення безвідходного виробництва тощо присвячені численні праці науковців. Зокрема, варто виділити науковців Вінницького національного аграрного університету, а саме Паламарчука В.Д., який розробив технологію вирощування кукурудзи на основі внесення дигестату для забезпечення сталого розвитку та підвищення родючості ґрунту шляхом зменшення навантаження на ґрунт синтетичних речовин [6]. Гончарук І.В. досліджувала напрями використання відходів тваринництва для забезпечення енергетичної незалежності та поповнення енергетичного балансу [16–17]; Калетнік Г.М. приділяє увагу необхідності розвитку безвідходного виробництва для формування енергетичної автономії сільськогосподарських підприємств України [1]; Токарчук Д.М. у своїх працях досліджує основні засади використання відновлюваних і альтернативних джерел енергії як важливого фактору підвищення енергетичної безпеки та зниження антропогенного впливу на довкілля [3]; Пришляк Н.В. присвячують свої праці дослідженню ролі органічних відходів у забезпеченні держави енергетичними ресурсами при поліпшенні екологічного стану довкілля [3]. Панцирева Г.В. розробила системи застосування біоорганічних добрив у системі ґрунтового використання на основі мобілізаційних агропідходів та врахування природних процесів ґрунтового-імобілізаційного характеру на зернобобових культурах [7; 15]. Основні принципи ґрунотворення розроблені Цицорою Я.Г [2].

Численними дослідженнями встановлено, що кількість дигестату приблизно подібна до маси завантаженого субстрату, що використовується в анаеробному процесі на біогазовій установці. Це зумовлює необхідність в облаштуванні спеціальних місць тимчасового зберігання збродженого субстрату, заняття нових територій під майданчики, збільшує транспортні витрати на його перевезення тощо. Натомість, маса самого дигестату біогазових установок може бути зменшена, якщо частину технологічної рідини повернути до ферментаційного відсіку біогазової установи [1].

Зарубіжні дослідники стверджують, що застосування дигестату стимулює ріст ґрунтових мікроорганізмів та їх метаболічну діяльність [5]. Дигестат, який отримують із біогазової установи, здатен підвищувати врожайність сільськогосподарських культур у порівнянні з гноєм на 10-30% [2; 3; 15–16]. У результаті проведених дослідів після внесення дигестату із біогазової установи

було встановлено збільшення врожайності картоплі на 30%, багаторічних злакових газонних трав – у 3 рази, розсади капусти і томатів – на 12-15%, біомаси в цілому – на 30-50% [6].

Аналіз наукових праць і вагомого масиву історико-наукової, біографічної, науково-популярної літератури [5; 11–13] доводить, що тематика розробки біоорганічної технології вирощування сільськогосподарських культур на основі внесення дигестату для забезпечення продовольчої безпеки держави на засадах сталого розвитку та підвищення родючості ґрунту актуальна не лише в Україні, але й у рамках світового масштабу стала предметом наукового пізнання.

Однак, не всі аспекти наближення вітчизняного ведення сільськогосподарської практики до європейської та забезпечення її ефективності у питаннях, а саме зменшення негативного впливу виробничо-господарської діяльності агропідприємств на навколишнє природне середовище досліджено у повній мірі.

Мета статті полягає у формуванні еколого-економічних аспектів виробництва дигестату на засадах сталого розвитку та підвищення родючості ґрунту.

Методологічною основою дослідження є фундаментальні положення розробки зональних технологічних прийомів вирощування сільськогосподарських культур. Дослідження, що були проведені авторами в рамках виконання прикладного дослідження на тему: «Розробка біоорганічних технологій вирощування сільськогосподарських культур для виробництва біопалив і

забезпечення енергонезалежності АПК» (номер державної реєстрації 0123U100311) дозволили розробити ефективні регламенти застосування різних варіантів біоудобрення сільськогосподарських культур за схемами ґрунтового та позакореневого їх застосування або ж у варіантах комбінованого використання.

Виклад основного матеріалу дослідження. Світова тенденція глобального потепління і, як наслідок, зміна клімату, що характеризується підвищенням температурних режимів і зменшенням кількості опадів, з року в рік призводять до деградації ґрунтів – ерозій, забруднення, підкислення і засолення (рис. 1).

Важко переоцінити значення органічних добрив в підтримці позитивного балансу гумусу. Так, в залежності від особливостей ґрунтового покриву, якості гною, при внесенні однієї тони його утворюється така кількість гумусу: в Поліссі – 42 кг, Лісостепу та Степу – 54-56 кг. Встановлено, що 20-25% органічної речовини, що вноситься в ґрунт з добривами, йде на збільшення запасів гумусу, а 75-80% мінералізується мікроорганізмами з метою отримання енергії [2].

За даними ФАО, суттєвої деградації зазнало 20% українських земель сільськогосподарського призначення, решта перебуває під загрозою (рис. 2).

У результаті застосування органічних добрив в складі органічної речовини ґрунтів збільшується кількість лабільних форм гумусових речовин, а також водорозчинних органічних речовин, які впливають на ріст та розвиток рослин. Використання органічних добрив на ґрунтах з кислою

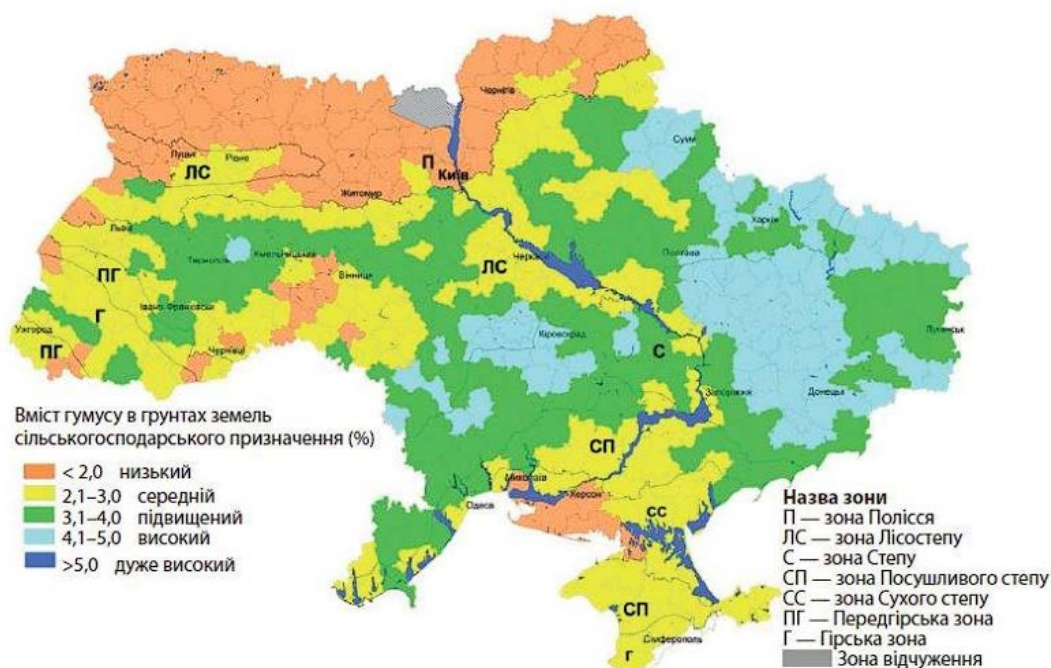


Рисунок 1 – Вміст гумусу в ґрунтах сільськогосподарського призначення

Джерело: [2]

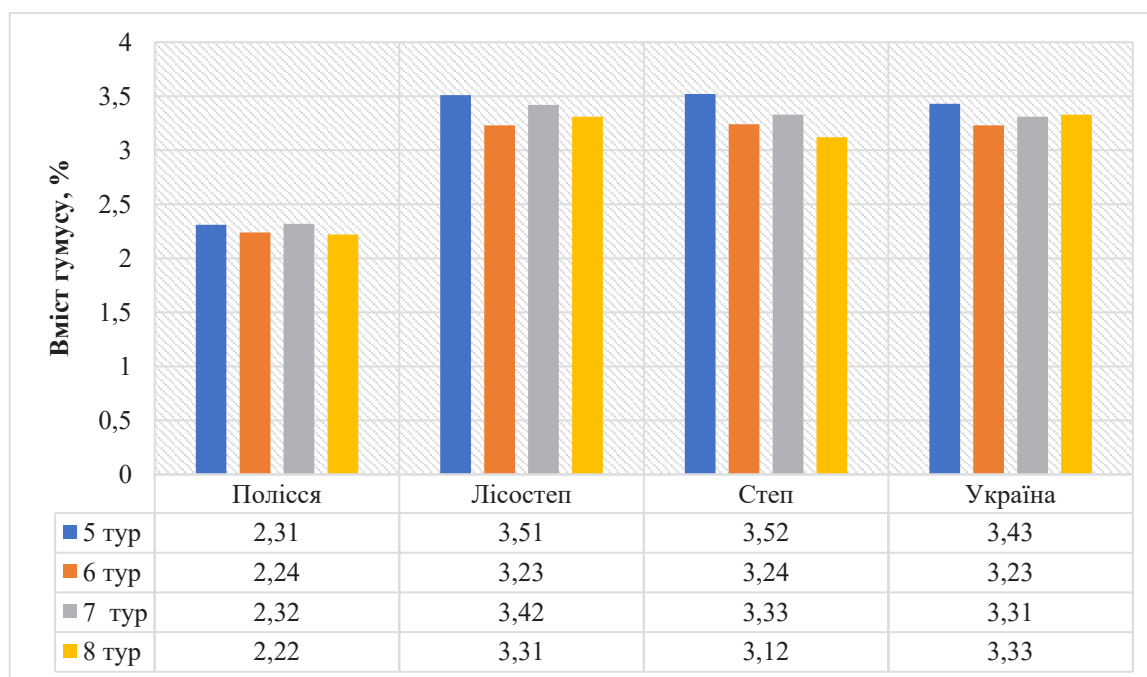


Рисунок 2 – Зональна динаміка вмісту гумусу у ґрунті, % (середнє за 1990–2023 рр.)

Джерело: сформовано авторами на основі власних досліджень

реакцією не тільки покращує живлення рослин, але і сприяє зниженню кислотності ґрунту [11].

Необхідно також зазначити, що кожна тонна внесена в ґрунт гною за роки його дії в багатопільній сівозміні дає додатково до 1 ц перерахунку на зерно, а кожен центнер мінеральних добрив в стандартних туках, при їх внесенні під основні польові культури (пшениця озима, кукурудза, ячмінь, просо) – в середньому до 1,5 ц зерна. Особливу роль органічні добрива мають за органічної системи землеробства; тут вони стають основним і єдиним джерелом формування поживного режиму рослин і родючості ґрунту. У зв'язку з цим, в процесі розробки і впровадження систем органічного землеробства та відмовою від мінеральних добрив, нагальним став пошук ефективних та надійних джерел компенсації елементів живлення й створення у ґрунті позитивного балансу гумусу.

Основними хімічними елементами, завдяки наявності яких у родючому шарі ґрунту підвищується врожайність сільськогосподарських культур (зернових, бобових і технічних культур), є нітроген, фосфор, калій, і для деяких рослин – магній. Із наукової літератури було підібрано, узагальнено та проаналізовано дані про вартість поживних елементів у широко застосовуваних неорганічних добривах (карбамід, аміачна селітра, сульфат амонію, амофос, діаммофоска, нітроаммофоска, суперфосфат, КАС-32, калій хлористий). У цих добривах такі поживні елементи, як нітроген, фосфор, калій та магній, знаходяться у вигляді солей –

нітратів, фосфатів, калійних і магнієвих. Враховуючи хімічні формули солей добрив, було визначено частку кожного з елементів, і, базуючись на ціні мінерального добрива та частці кожного із складових поживних елементів, розраховано вартість кожного елемента. Таким чином, вартість нітрогену в мінеральних добривах, які збалансовані за вмістом складових елементів для різних видів сільськогосподарських рослин, становить 6,12 доларів за 1 т, фосфору – 1,46 доларів за 1 т, калію – 2,34 доларів за 1 т, магнію – 0,65 доларів за 1 т відповідно (табл. 1).

Відтак, орієнтуючись на середній курс української гривні щодо долара США станом на грудень 2023 року, було розраховано вартість кожного з поживних елементів добрива в доларах США. Одержані розрахунки можна використовувати при ціноутворенні екологічно чистого органо-мінералізованого добрива на основі дигестату. Відтак, у фракціях дигестату міститься значно більше калію в порівнянні з біодобривом на основі коров'ячого гною, проте зберігається співвідношення нітрогену, фосфору й магнію.

Загальновідомо, що дигестат містить значну кількість мінеральних елементів (азот, фосфор, калій). За швидкістю дії (поглинання елементів рослинами) він нагадує мінеральні добрива, оскільки елементи N, P і K легко доступні рослинам. Целюлоза після перетравлення також містить частину органічної речовини, що позитивно впливає на фізико-хімічні властивості удобрених ґрунтів. Кількість дигестату приблизно подібна до

Таблиця 1 – Вміст основних елементів живлення та вартість виробництва біодобрив, \$/т*

Основні елементи живлення	Вміст поживних елементів у біодобриві (кг/т)	Вартість поживної речовини в 1 тонні органічного добрива	Вміст поживних елементів у біодобриві (кг/т)	Вартість поживної речовини в 1 тонні органічного добрива
N	0,87	1,67	3,55	5,22
P	1,13	1,46	1,36	2,23
K	1,99	2,34	4,54	4,34
Mg	0,55	0,65	0,32	0,42
Усього	4,55	6,12	9,77	12,21

Примітка: *за середнім курсом валют станом на 31.12. 2023 року

Джерело: сформовано авторами на основі власних досліджень

маси завантаженого субстрату, що використовується в анаеробному процесі на біогазовій станції. Це зумовлює необхідність в облаштуванні спеціальних місць тимчасового зберігання збродженого субстрату, заняття нових територій під майданчики, збільшує транспортні витрати на його перевезення тощо. Натомість маса самого дигестату біогазових установок може бути зменшена, якщо частину технологічної рідини повернути до ферментаційного відсіку біогазової установки [3].

Окрім того, зброджений субстрат може або зберігатися і використовуватися як ферменти, або бути розділений на рідку та тверду фракції. Поділ призведе до утворення двох різних добрив із контрастними властивостями: рідке добриво і твердий органічний залишок, який можна використовувати безпосередньо як органічну добавку, або може бути компостованим чи дегідратованим перед внесенням у ґрунт. У свою чергу, досягти оптимальної маси та необхідної вологості дигестату можна шляхом використання однієї із відомих технологій, зокрема сепарації, центрифугування, концентрування, сушіння, гранулювання або вилученням окремих елементів із його складу [4; 11].

Дигестат містить низку поживних речовин, таких як: азот – 2,3-4,2 кг/т, фосфор – 0,2-1,5 кг/т, калій – 1,3-5,2 кг/т; низку мезо- і мікроелементів, що грають істотну роль у розвитку культур (Ca, Mg, Mn, B, Fe). Окрім цього, дигестат містить органічний вуглець, у тому числі в складі гумінових речовин (1-3% по масі), має високу частку доступного для рослин азоту (до + 10...70% у порівнянні з не збродженими матеріалами), оптимальне для ґрунту співвідношення C:N, оптимальне для ґрунту значення показника pH 6,8-7,5, містить активні популяції бактерій, що сприяють розпаду органіки в ґрунті [2].

Рециклінг органічних матеріалів у ґрунт вважається у більшості випадків найкращим екологічним підходом, що дає змогу замикати колообігу природних поживних речовин та вуглецю. Органічні матеріали є цінним джерелом основних поживних речовин (таких як азот – N, фосфор – P₂O₅, калій – K₂O та сірка – SO₃), які мають важливе значення для росту рослин, а значить сталого виробництва продукції рослинництва. Органічні

матеріали також є цінним джерелом органічних речовин, що сприяють водонасиченню ґрунтів, полегшують механічну обробку та стійкість ґрунту до ерозії тощо.

За наявними оцінками у 2023 році в Європі було вироблено від 222 до 258 млн тонн дигестату. До 2030 року завдяки росту виробництва біометану щорічно буде продукуватися 455-492 млн тонн дигестату, а до 2050 року – від 1145 до 1334 млн тонн.

Дигестат вже сьогодні може замінити 5-6% синтетичних азотних добрив, отриманих у процесі фіксації азоту з використанням природного газу (процес Габера-Боша). До 2030 року можна буде замінити 10–11% синтетичних азотних добрив, а до 2050 року потенціал заміни цих добрив зросте до 26-31%. Подібним чином дигестат вже сьогодні може замінити у Європі 17% синтетичних фосфорних добрив. До 2030 року можна буде замінити 32%, а до 2050 року потенціал заміни синтетичних фосфорних добрив досягне 86%.

Потенціал скорочення викидів парникових газів в умовах заміни синтетичних азотних добрив дигестатом становить 1096 тонн CO₂-екв. у 2021 році. До 2030 року можна буде уникнути 2106 тонн CO₂-екв./рік, а до 2050 року потенціал скорочення викидів парникових газів досягне 5716 тонн CO₂-екв./рік.

Природний газ є основною сировиною та джерелом енергії для виробництва синтетичних добрив. Таким чином, заміна мінеральних добрив дигестатом призводить до додаткового зменшення споживання природного газу. Заміна 5-6% синтетичних азотних добрив дигестатом вже сьогодні може заощадити 0,6 млрд м³ природного газу. Прогнози показують, що до 2030 і 2050 років можна буде уникнути споживання природного газу на 1,1 і 5,9 млрд м³ відповідно.

Найбільш простим способом використання «сирого» дигестату як органічного добрива для покращення родючості ґрунту є його безпосереднє внесення на поля без будь-якої попередньої обробки. Втім, така практика має ряд недоліків та обмежень, а тому не є поширеною в умовах сьогодення.

Біогазові станції, як правило, працюють безперервно протягом року, що обумовлює необхідність

накопичення дигестату на періоди між осіннім та весняним внесеннями на поля. Тривале зберігання в негерметичних резервуарах призводить до осідання твердих часток і їх накопичення. Зі збільшенням маси «неперетравлених» органічних речовин при тривалому зберіганні дигестату пропорційно збільшуються викиди парникового газу, метану, в атмосферу (до 5-10% його потенціалу в сировині). Окрім того, враховуючи часто досить високий вміст крупних часток у «сирому» дигестаті, існують технічні обмеження при розподіленні його в ґрунтах, фактично залишаючи місце лише поверхневому розбризкуванню або розливу. При цьому втрачається значна частина легкодоступного азоту для рослин, а також поширюються на значні площі неприємні запахи. Враховуючи це, попередня обробка «сирого» дигестату в більшості випадків є необхідною.

Як правило, першим етапом обробки «сирого» дигестату на більшості біогазових станцій є розділення його на тверду та рідку фракції, переважно в сепараторах шнекового типу. При цьому об'єм рідкої фракції вдається зменшити на 10-20%, в залежності від виду вхідної сировини та типу сепаратора.

Сепарація призводить до утворення двох продуктів з різною функціональністю: 1) твердої фракції із вмістом сухої речовини 20-40%, збагаченої вуглецем та фосфором, та 2) рідкої фракції зі вмістом сухих речовин 1-8%, збагаченої азотом та калієм (рис. 3).

Внесення дигестату знижує потенціал ерозії ґрунту та підвищує його продуктивність, збільшуючи вміст органічної речовини у ґрунті та покращуючи його родючі властивості, у тому числі, завдяки постачанню поживних речовин. Технологія анаеробного зброджування є по суті важливою

ланкою в рециклінгу органічної сировини в сільському господарстві.

Дигестат зазвичай використовується як добриво для сільськогосподарських культур без додаткової обробки, замінюючи тим самим промислові мінеральні добрива. Однак потреба в ефективному поводженні з поживними речовинами, з огляду на обмежені можливості внесення гною в районах з високою щільністю тварин, а також виснаження світових природних запасів фосфору та калію, робить виділення та реціклінг поживних речовин з гною та інших потоків відходів.

Ефективне використання органічних матеріалів, зокрема і дигестату на їх основі, є вкрай актуальним і в умовах України. Розвинений агропромисловий сектор економіки України з великою кількістю сільськогосподарських земель потребує значних обсягів добрив. Форми господарювання і власності на землю за роки незалежності України негативно позначилися на родючості ґрунтів, що проявляється у втраті значної частини гумусу, незбалансованості вмісту поживних елементів, підкисленні та залуженні ґрунтів, дефіциті рухомих форм фосфору, калію та ряду мікроелементів, переущільненні, хімічному та радіаційному забрудненні, ерозії. Причини такого стану ґрунтів криються зокрема в інтенсивному виробництві за домінуючого використання мінеральних добрив та критичного падіння обсягів використання органічних добрив.

Збільшення надходження органічних добрив в ґрунт можливе за такими основними напрямками:

- Збільшення обсягів внесення гною/посліду, що в свою чергу потребує збільшення поголів'я тварин.

- Збільшення частки поживних решток, що вносяться в ґрунт.



Рисунок 3 – Рециклінг виробництва дигестату з органічної сировини

– Повернення поживних речовин з потоками залишків/відходів перетвореної первинної аграрної продукції (міські харчові відходи, побічна продукція харчової переробної промисловості, некондиційний урожай тощо).

– Використання потенціалу деградованих земель, непридатних для ведення традиційного агровиробництва, для продукування рослинної біомаси (багаторічні трави), що буде направлятися для удобрення ріллі.

– Використання потенціалу лугових земель, газонів, для збору рослинної біомаси, що буде направлятися для удобрення ріллі.

Збільшення поголів'я тварин з огляду на наявні тенденції на ринку тваринництва в Україні на сьогодні малоймовірне. Використання залишків/відходів перетвореної первинної аграрної продукції як органічного добрива може бути можливим лише після попередньої обробки різними методами біоконверсії, в т.ч. компостування та анаеробного зброджування, виробництва комплексних органо-мінеральних добрив. Використання біомаси з деградованих земель та трав'яних покривів також доцільне за умови попередньої обробки (компостування, анаеробне зброджування).

Внесення значних обсягів поживних решток в ґрунт як спосіб удобрення має певні обмеження, що полягають в необхідності внесення азотних добрив для збалансування С:N співвідношення та необхідності регулювання закисленості внаслідок виділення органічних кислот під час розпаду соломи в ґрунті.

Згідно з даними Міністерства аграрної політики України встановлено, що на 1 т поживних решток за удобрювальною цінністю еквівалентна внесенню близько 3 т гною, втім для азотної компенсації необхідно внести на кожен тону поживних решток 22-25 кг діючої речовини азотних добрив. Поліпшення гуміфікації рослинних решток та гною можливе як агротехнічними заходами, що реалізуються безпосередньо в ґрунті, а також шляхом попередньої обробки методами біоконверсії, у тому числі компостуванням та анаеробним зброджуванням.

Прирости врожайності при внесенні оптимальних норм дигестату: бульб картоплі – 0,6 т/га, зеленої маси кукурудзи – 10 т/га і зерна ячменю в післядії – до 0,7 т/га (табл. 2).

Дигестат найдоцільніше вносити під культури, що забезпечують найбільший приріст урожайності від внесення органічних добрив. У порівнянні з торфом вони мають сприятливіші агрохімічні властивості. Найбільш високу ефективність за застосування забезпечують буряк, картопля, кукурудза, капуста, а на піщаних ґрунтах жито озиме і ярі зернові.

Проведені дослідження показали, що дигестат найдоцільніше вносити влітку і восени під зяблеву оранку, де відмічені найбільші прирости врожайності сільськогосподарських культур. Внесений весною дигестат не може в достатній мірі розкластися з вивільненням доступних для живлення рослин мінеральних з'єднань. Використання дигестату в рекомендованих нормах не лише збільшує врожайність, але і поліпшує агрохімічні властивості ґрунту: збільшується вміст легкогідролізуемого азоту і рухомого фосфору, стабілізується вміст гумусу, збільшується рН сольового розчину.

Висновки. Заміна 5-6% синтетичних азотних добрив дигестатом вже сьогодні може заощадити 0,6 млрд м³ природного газу. Використання дигестату в рекомендованих нормах не лише збільшує врожайність, але і поліпшує агрохімічні властивості ґрунту: збільшується вміст легкогідролізуемого азоту і рухомого фосфору, стабілізується вміст гумусу, збільшується рН сольового розчину.

Збільшення надходження органічних добрив в ґрунт можливе за такими основними напрямками:

– Збільшення обсягів внесення гною/посліду, що в свою чергу потребує збільшення поголів'я тварин.

– Збільшення частки поживних решток, що вносяться в ґрунт.

– Повернення поживних речовин з потоками залишків/відходів перетвореної первинної аграрної продукції (міські харчові відходи, побічна продукція харчової переробної промисловості, некондиційний урожай тощо).

– Використання потенціалу деградованих земель, непридатних для ведення традиційного агровиробництва, для продукування рослинної біомаси (багаторічні трави), що буде направлятися для удобрення ріллі.

– Використання потенціалу лугових земель, газонів, для збору рослинної біомаси, що буде направлятися для удобрення ріллі.

Таблиця 2 – Приріст врожаю при внесенні дигестату під основні сільськогосподарські культури

Сільськогосподарські культури	Приріст, т/га	Приріст, %
Картопля	0,6	12
Кукурудза на силос	10,0	4
Кукурудза на зерно	1,1	9
Пшениця озима	0,9	8
Ячмінь	0,7	11
Цукровий буряк	1,8	13

Список використаних джерел:

1. Kaletnik G., Honcharuk I. Okhota Yu. The Waste-Free Production Development for the Energy Autonomy Formation of Ukrainian Agricultural Enterprises. *Journal of Environmental Management and Tourism*. Vol. 11. № 3. P. 513–522. DOI: [https://doi.org/10.14505//jemt.v11.3\(43\).02](https://doi.org/10.14505//jemt.v11.3(43).02)
2. Цицюра Я.Г., Броннікова Л.Ф., Пелех Л.В. Грунтовий покрив Вінниччини: генезис, склад, властивості та напрями ефективного використання : монографія. Вінниця : ТОВ «Нілан-ЛТД», 2017. 452 с.
3. Пришляк Н.В., Токарчук Д.М., Паламаренко Я.В. Забезпечення енергетичної та екологічної безпеки держави за рахунок біопалива з біоенергетичних культур і відходів : монографія. Вінниця : Консоль, 2019. 248 с.
4. Miceikienė A., Gesevičienė K., Rimkuvienė D. Assessment of the Dependence of GHG Emissions on the Support and Taxes in the EU Countries. *Sustainability*. 2021. Vol. 13 (14). DOI: <https://doi.org/10.3390/su13147650/>
5. Mazur V.A., Branitskyi Y.Y., Pansyryeva H.V. Bioenergy and economic efficiency technological methods growing of switchgrass. *Ukrainian Journal of Ecology*. 2020. № 10 (2). P. 8–15.
6. Паламарчук В.Д., Кричковський В. Ю. Ефективність використання дигестату при вирощуванні моркви та буряків столових. *Корми і кормовиробництво*. 2020. № 90. С. 68–82.
7. Pansyryeva H., Vovk V., Bronnicova L., Zabarna T. Efficiency of the Use of Lawn Grasses for Biology and Soil Conservation of Agricultural Systems under the Conditions of the Ukraine's Podillia. *Journal of Ecological Engineering*. 2023. Vol. 24 (11). P. 249–256. DOI: <https://doi.org/10.12911/22998993/171649>
8. Bakhmat M., Padalko T., Krachan T., Tkach O., Pansyryeva H., Tkach L. Formation of the Yield of *Matricaria recutita* and Indicators of Food Value of *Sychorium intybus* by Technological Methods of Co-Cultivation in the Interrows of an Orchard. *Journal of Ecological Engineering*. 2023. Vol. 24 (8). P. 250–259. DOI: <https://doi.org/10.12911/22998993/166553>
9. Mazur V., Pansyryeva H., Mazur K., Myalkovsky R., Alekseev O. Agroecological prospects of using corn hybrids for biogas production. *Agronomy Research*. 2020. Vol. 18. P. 177–182. DOI: <https://doi.org/10.15159/ar.20.016>
10. Петренко І.О. Інструменти економічного забезпечення екологічної безпеки в аграрному секторі. *АгроСвіт*. 2020. № 3. С. 15–21.
11. Рибіна Л.О. Екологічні аспекти інноваційного розвитку АПК. *Вісник Сумського національного аграрного університету*. 2009. № 2. С. 78–83.
12. Nosheen S., Ajmal I., Song, Y. Microbes as Biofertilizers a Potential Approach for Sustainable Crop Production. *Sustainability*. 2021. Vol. 13 (4). P. 1–20. DOI: <https://doi.org/10.3390/su13041868>
13. Kaletnik H., Pryshliak V., Pryshliak N. Public Policy and Biofuels: Energy, Environment and Food Trilemma. *Journal of Environmental Management & Tourism*. 2019. Vol. 10. № 2 (24). P. 479–487.
14. Mazur V.A., Didur I.M., Pansyryeva H.V., Telekalo N.V. Energy-economic efficiency of growth of grain-crop cultures in conditions of right-bank forest-steppe zone of Ukraine. *Ukrainian Journal of Ecology*. 2018. Vol. 8. № 4. P. 26–33.
15. Панцирева Г.В. Вплив технологічних прийомів вирощування на зернову продуктивність зернобобових культур в умовах правобережного Лісостепу України. *Наукові доповіді НУБІП*. 2020. Вип. 5 (87). С. 1–9.
16. Honcharuk I., Matusyak M., Pansyryeva H., Kupchuk I., Prokopchuk V., Telekalo N. Peculiarities of reproduction of *pinus nigra* arn. in Ukraine. *Bulletin of the Transilvania University of Brasov. Series II: Forestry, Wood Industry, Agricultural Food Engineering*. 2022. Vol. 15 (64). № 1. P. 33–42.
17. Гончарук І.В., Панцирева Г.В., Вовк В.Ю., Верхолук С.Д. Дослідження екологічної безпеки та економічної ефективності дигестату як біодобрива. *Збалансоване природокористування*. 2023. № 2. С. 86–92. DOI: <https://doi.org/10.33730/2310-4678.2.2023.28274>

References:

1. Kaletnik G., Honcharuk I. Okhota Yu. (2020) The Waste-Free Production Development for the Energy Autonomy Formation of Ukrainian Agricultural Enterprises. *Journal of Environmental Management and Tourism*, vol. 11, no. 3, pp. 513–522. DOI: [https://doi.org/10.14505//jemt.v11.3\(43\).02](https://doi.org/10.14505//jemt.v11.3(43).02)
2. Tsytsiura Ya. H., Bronnikova L. F., Pelekh L. V. (2017) *Gruntovyi pokryv Vinnychchyny: henezys, sklad, vlastyvosti ta napriamy efektyvnoho vykorystannia: monohrafiia* [Soil cover of Vinnytsia region: genesis, composition, properties and directions of effective use: monograph]. Vinnytsia: TOV "Nilan-LTD". (in Ukrainian)
3. Pryshliak N. V., Tokarchuk D. M., Palamarenko Ya. V. (2019) *Zabezpechennia enerhetychnoi ta ekolohichnoi bezpeky derzhavy za rakhunok biopalyva z bioenerhetychnykh kultur i vidkhodiv: monohrafiia* [Ensuring energy and environmental security of the state through biofuels from bioenergy crops and waste: monograph]. Vinnytsia: Konsol. (in Ukrainian)
4. Miceikienė A., Gesevičienė K., Rimkuvienė D. (2021) Assessment of the Dependence of GHG Emissions on the Support and Taxes in the EU Countries. *Sustainability*, vol. 13 (14). DOI: <https://doi.org/10.3390/su13147650/>
5. Mazur V. A., Branitskyi Y. Y., Pansyryeva H. V. (2020) Bioenergy and economic efficiency technological methods growing of switchgrass. *Ukrainian Journal of Ecology*, no. 10 (2), pp. 8–15.
6. Palamarchuk V. D., Krychkovskiy V. Yu. (2020) *Efektynnist vykorystannia dyhestatu pry vyroshchuvanni morkvy ta buriakiv stolovykh* [Effectiveness of using digestate in the cultivation of table carrots and beets]. *Kormy i kormovyrobnystvo – Fodder and fodder production*, no. 90, pp. 68–82. (in Ukrainian)
7. Pansyryeva H., Vovk V., Bronnicova L., Zabarna T. (2023) Efficiency of the Use of Lawn Grasses for Biology and Soil Conservation of Agricultural Systems under the Conditions of the Ukraine's Podillia. *Journal of Ecological Engineering*, vol. 24 (11), pp. 249–256. DOI: <https://doi.org/10.12911/22998993/171649>

8. Bakhmat M., Padalko T., Krachan T., Tkach O., Pantsyreva H., Tkach L. (2023) Formation of the Yield of *Matricaria recutita* and Indicators of Food Value of *Sychorium intybus* by Technological Methods of Co-Cultivation in the Interrows of an Orchard. *Journal of Ecological Engineering*, vol. 24 (8), pp. 250–259. DOI: <https://doi.org/10.12911/22998993/166553>
9. Mazur V., Pantsyreva H., Mazur K., Myalkovsky R., Alekseev O. (2020) Agroecological prospects of using corn hybrids for biogas production. *Agronomy Research*, vol. 18, pp. 177–182. DOI: <https://doi.org/10.15159/ar.20.016>
10. Petrenko I. O. (2020) Instrumenty ekonomichnoho zabezpechennia ekolohichnoi bezpeky v ahrarynomu sektori [Instruments of economic provision of ecological security in the agricultural sector]. *AhroSvit – AgroWorld*, no. 3, pp. 15–21. (in Ukrainian)
11. Rybina L. O. (2009) Ekolohichni aspekty innovatsiinoho rozvytku APK [Ecological aspects of the innovative development of agriculture]. *Visnyk Sumskoho natsionalnoho ahrarynoho universytetu – Bulletin of the Sumy National Agrarian University*, no. 2, pp. 78–83. (in Ukrainian)
12. Nosheen S., Ajmal I., Song, Y. (2021) Microbes as Biofertilizers a Potential Approach for Sustainable Crop Production. *Sustainability*, vol. 13 (4), pp. 1–20. DOI: <https://doi.org/10.3390/su13041868>
13. Kaletnik H., Pryshliak V., Pryshliak N. (2019) Public Policy and Biofuels: Energy, Environment and Food Trilemma. *Journal of Environmental Management & Tourism*, vol. 10, no. 2 (24), pp. 479–487.
14. Mazur V. A., Didur I. M., Pantsyreva H. V., Telekalo N. V. (2018) Energy-economic efficiency of growth of grain-crop cultures in conditions of right-bank forest-steppe zone of Ukraine. *Ukrainian Journal of Ecology*, vol. 8, no. 4, pp. 26–33.
15. Pantsyreva H. V. (2020) Vplyv tekhnolohichnykh pryiomiv vyroshchuvannia na zernovu produktyvnist zernobobovykh kultur v umovakh pravoberezhnoho Lisostepu Ukrainy [The influence of technological methods of cultivation on the grain productivity of leguminous crops in the conditions of the right-bank forest-steppe of Ukraine]. *Naukovi dopovidi NUBIP – Scientific reports of NUBIP*, vol. 5 (87), pp. 1–9. (in Ukrainian)
16. Honcharuk I., Matusyak M., Pantsyreva H., Kupchuk I., Prokopchuk V., Telekalo N. (2022) Peculiarities of reproduction of *pinus nigra* arn. in Ukraine. *Bulletin of the Transilvania University of Brasov. Series II: Forestry, Wood Industry, Agricultural Food Engineering*, vol. 15 (64), no. 1, pp. 33–42. (in Ukrainian)
17. Honcharuk I. V., Pantsyreva H. V., Vovk V. Yu., Verkholiuk S. D. (2023) Doslidzhennia ekolohichnoi bezpeky ta ekonomichnoi efektyvnosti dyhestatu yak biodobryva [Study of ecological safety and economic efficiency of digestate as a biofertilizer]. *Zbalansovane pryrodokorystuvannia – Balanced nature management*, no. 2, pp. 86–92. DOI: <https://doi.org/10.33730/2310-4678.2.2023.28274> (in Ukrainian)

Стаття надійшла до редакції 12.04.2024