

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
УМАНСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
УМАНСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Кваліфікаційна наукова праця  
на правах рукопису

**ШЕВЧУК ОЛЕКСАНДР ВІКТОРОВИЧ**

УДК 631.4:631.8:631.87]( 477.4)

**ДИСЕРТАЦІЯ**

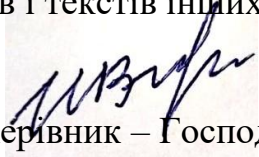
**АГРОХІМІЧНА ЕФЕКТИВНІСТЬ СУПУТНИХ ПРОДУКТІВ  
ВИРОБНИЦТВА БІОГАЗУ НА СІРОМУ ЛІСОВОМУ ҐРУНТІ  
ПРАВОБЕРЕЖНОГО ЛІСОСТЕПУ УКРАЇНИ**

201 – Агрономія

20 – Аграрні науки та продовольство

Подається на здобуття ступеня доктора філософії

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело



Олександр ШЕВЧУК

Науковий керівник – Господаренко Григорій Миколайович, доктор  
сільськогосподарських наук, професор

Умань – 2026

## АНОТАЦІЯ

*Шевчук О. В.* Агрохімічна ефективність супутніх продуктів виробництва біогазу на сірому лісовому ґрунті Правобережного Лісостепу України. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 201 «Агрономія» (20 – Аграрні науки та продовольство). – Уманський національний університет, Умань, 2026.

За останнє десятиріччя виробництво біогазу у світі анаеробним бродінням значно зросло. При цьому збільшилась і кількість супутніх продуктів його виробництва – дигестатів. Повернення органічних відходів рослин і тварин у виробничий цикл, де субстрати отримують у процесі виробництва біогазу (циркулярна утилізація відходів), є перспективним для участі в циклі відновлюваної енергії, а їх використання для удобрення може мати позитивний вплив на клімат, довкілля та сталість сільськогосподарського виробництва.

Встановлено, що дигестат має високий вміст макро- та мікроелементів у розрахунку на суху речовину і може бути цінним удобрювальним продуктом, з урахуванням того, що його потрібно утилізували на незначній відстані від біогазової установки. При цьому кожна партія дигестату – це окреме добриво, що має різний макро- й мікроелементний склад і вміст органічної речовини. Він потребує попереднього аналізування. І вже на основі отриманих результатів можна визначити допустимі дози внесення під певну сільськогосподарську культуру. Нині немає жодних обмежень щодо реалізації дигестату як удобрювального продукту органічного походження.

Дослідженнями було встановлено закономірності зміни агрохімічного стану ґрунту, можливості використання рідкого дигестату для удобрення пшениці м'якої озимої і кукурудзи за різних доз внесення та поєднання з мінеральними добривами, його впливу на врожай і якість зерна та зараження його патогенами; показано агрохімічну, економічну та енергетичну

ефективності його застосування; оцінено перспективи застосування дигестату у заходах відновлення родючості ґрунтів.

Проведеними дослідженнями вирішено актуальне науково-прикладне завдання в сучасному розвитку сільського господарства щодо оптимального поєднання галузей тваринництва й рослинництва. Повернення в ґрунт дигестату не лише вирішує ефективне використання супутніх продуктів біогазового виробництва, але й триєдине завдання – відновлення родючості ґрунту, підвищення продуктивності сільськогосподарських культур, екологічно безпечна утилізація. Це забезпечує реалізацію концепції сталого розвитку.

Обґрунтовано і практично доведено агрохімічну доцільність й ефективність застосування дигестату біогазового виробництва з курячого посліду як удобрювального продукту під пшеницю м'яку озиму та кукурудзу, а також запропоновано вирішення питання еколого безпечної його утилізації на сірому лісовому ґрунті Правобережного Лісостепу за результатами агрохімічних, мікробіологічних та польових досліджень, визначення формування показників продуктивності культур, агрохімічної і економічної ефективності. Встановлено особливості росту й розвитку пшениці м'якої озимої і кукурудзи, закономірності формування їх продуктивності залежно від застосування різних доз дигестату. Обґрунтовано оптимальні дози внесення дигестату в агроценозах пшениці м'якої озимої і кукурудзи. Доведено, що при цьому підвищується врожайність і поліпшуються біохімічні показники якості зерна.

Удосконалено системи управління живленням пшениці м'якої озимої і кукурудзи у сучасних технологіях вирощування з урахуванням впливу дигестату на властивості ґрунту. Набули подальшого розвитку: вчення про можливість екологічно безпечної утилізації супутніх продуктів анаеробного зброджування курячого посліду в біогазовій станції як можливого джерела живлення рослин і органічних речовин у ґрунті з метою відновлення його біологічних функцій; удосконалено технологічні підходи їх застосування як

удобрювального продукту, оцінювання їхнього елементарного складу; наукові положення щодо підвищення продуктивності пшениці м'якої озимої і кукурудзи завдяки використанню нового виду органічних добрив (дигестату) зі сприятливими мікробіологічними і агрохімічними властивостями.

Розроблено алгоритм дій і пропозицій щодо повернення органічних відходів у виробничий цикл, що відповідає основним директивам ЄС. Використання дигестату з курячого посліду для удобрення, який містить значну кількість органічних і поживних речовин різного складу, допоможе оптимізувати надходження їх у ґрунт з метою підвищення врожайності та поліпшення якості зерна, відновлювати і підвищувати якість ґрунту, захищати довкілля та споживачів, зменшувати залежність від синтетичних добрив.

Досліджено хімічний склад супутніх продуктів біогазового виробництва з курячого посліду і встановлено порівняно високий вміст органічної речовини і поживних речовин, тому вони можуть застосовуватися як біоорганічні удобрювальні продукти. Визначено оптимальні дози дигестату на основі курячого посліду на сірому лісовому ґрунті в умовах Правобережного Лісостепу в системах удобрення пшениці м'якої озимої і кукурудзи. Це сприяє підвищенню їх продуктивності, відновленню родючості ґрунту, зменшенню використання штучних хімічних добрив, вартості сільськогосподарського виробництва та забруднення довкілля продуктами життєдіяльності птахів. У майбутньому використання супутніх продуктів біогазового виробництва буде все більше використовуватися для просування інтегрованого поєднання тваринництва та рослинництва і сприятиме формуванню низьковуглецевого, сталого та ефективного сільськогосподарського виробництва.

Розроблено практичні рекомендації застосування дигестату. Встановлено, що доцільним є ранньовесняне підживлення пшениці озимої рідким дигестатом дозою  $10 \text{ м}^3/\text{га}$ , що замінить внесення синтетичних азотних добрив загальною дозою  $109 \text{ кг/га д. р.}$  наповесні та на стадії ВВСН 28–29. За такого сценарію удобрення врожайність зерна може становити  $7,64\text{--}8,68 \text{ т/га}$  за вмісту білка  $10,7\text{--}11,4 \%$  залежно від погодних умов. Оцінено різне

поєднання дигестату з мінеральними добривами порівняно з традиційною системою застосування добрив і встановлено ефективність його внесення в дозі 20 м<sup>3</sup>/га або в поєднанні з аміаком водним у відношенні за азотом 1 : 1 за дози N<sub>200</sub>.

Дози внесення азоту з різними удобрювальними продуктами у підживлення та стадії розвитку рослин пшениці озимої істотно впливають на вміст азоту мінеральних сполук у шарі ґрунту 0–40 см. Підживлення дигестатом, порівняно з азотними добривами, поліпшує азотний режим ґрунту в кінці вегетації пшениці озимої.

Удобрення пшениці озимої азотними добривами (109 кг/га д. р.) і дигестатом забезпечує приріст урожайності 0,60–2,4 т/га або на 10–41 % і знижується зі збільшенням дози внесення дигестату з 10 до 20–30 м<sup>3</sup>/га. За дози дигестату 10 м<sup>3</sup>/га спостерігається лише тенденція до зниження врожайності зерна порівняно з виробничим контролем (N<sub>109</sub>) на 0,31 т/га або на 4 %.

Підживлення пшениці озимої дигестатом напровесні дозами більш як 30 м<sup>3</sup>/га не сприяє достовірному підвищенню врожайності пшениці озимої. За його дози 30 м<sup>3</sup>/га забезпечується формування достовірного приросту врожайності зерна – 0,78 т/га або на 15 % порівняно з контролем без підживлень, але при цьому поступається виробничому контролю з підживленнями посівів азотними мінеральними добривами дозою 109 кг/га д. р. Підвищення дози дигестату до 50 і 70 т/га достовірно не змінювало врожайність зерна порівняно з абсолютним контролем.

Ранньовесняне підживлення пшениці озимої дигестатом у дозі 10–30 м<sup>3</sup>/га за впливом на показники якості зерна не поступається традиційній системі її удобрення синтетичними азотними добривами. Зі збільшенням дози дигестату до 20 і 30 м<sup>3</sup>/га збір білка з одиниці площі посіву знижується відповідно на 16 і 42 %, що пояснюється зменшенням урожайності зерна.

Підживлення пшениці озимої дигестатом у дозі 10 м<sup>3</sup>/га забезпечує інтенсивність балансу азоту 61,0 %, фосфору – 168,4 і калію 200,5 %, що свідчить про необхідність додаткового внесення азоту. При цьому коефіцієнт

використання з дигестату азоту становить 82,6 %, фосфору – 32,6 й калію 77,4 % і знижується за дози його внесення 30 м<sup>3</sup>/га відповідно до 13,9 %, 4,8 і 22,0 %.

За різних систем удобрення врожайність кукурудзи збільшується на 2,65–2,96 т/га або на 46–51 % за врожайності на контролі без добрив 5,80 т/га. За внесення 10 м<sup>3</sup>/га дигестату в поєднанні з аміаком водним спостерігається тенденція збільшення врожайності на 0,31 т/га або на 12 % порівняно з внесенням лише дигестату в дозі 20 м<sup>3</sup>/га.

Внесення під кукурудзу дигестату в дозі 20 м<sup>3</sup>/га порівняно з виробничим контролем 200 кг/га у вигляді аміаку водного істотно не змінює показників якості зерна. При цьому спостерігається тенденція поліпшення натури зерна та вмісту в ньому протеїну.

Найбільш сприятливо баланс азоту, фосфору та калію в ґрунті за умови видалення з поля лише зерна кукурудзи – відповідно 68,0 кг/га, 54,1 і 44,2 кг/га складається за системи удобрення Дигестат 10 м<sup>3</sup>/га + Nва і загальної дози азоту 200 кг/га.

Найменші витрати дигестату на формування 1 т зерна пшениці озимої (4,6 м<sup>3</sup>) забезпечує підживлення ним напровесні дозою 10 м<sup>3</sup>/га. При цьому 1 м<sup>3</sup> дигестату сприяє формуванню 216 кг зерна. Витрати азоту добрив на формування 1 т приросту врожаю зерна кукурудзи на 4 % менші порівняно з виробничим контролем (N<sub>200</sub> у вигляді аміаку водного) за поєднання в системі її удобрення дигестату та аміаку водного у відношенні 1 : 1 за азотом. При цьому окупність азоту збільшується на 11 % порівняно з його внесенням у вигляді дигестату дозою 20 м<sup>3</sup>/га.

Застосування дигестату в системі удобрення пшениці озимої і кукурудзи є економічно виправданим і може замінити дороговартісні синтетичні азотні добрива. При цьому необхідно врахувати перш за все витрати на транспортування дигестату від біогазової установки до поля. Окупність 1 грн витрат за різних систем удобрення пшениці озимої змінюється в межах 0,5–

4,8 грн і є найвищою за підживлення її дигестатом дозою 10 м<sup>3</sup>/га, навіть за його перевезення на відстань до 56 км.

За внесення під кукурудзу 200 кг/га азоту вартість приросту врожаю зерна змінюється від 20,1 тис. до 22,5 тис. грн/га залежно від варіанту дослідів і є найвищою за внесення 10 м<sup>3</sup>/га дигестату в поєднанні з аміаком водним 1 : 1.

За ранньовесняного підживлення пшениці озимої дигестатом дозою 10 м<sup>3</sup>/га чистий енергетичний прибуток становить 30,35 ГДж/га, або 99 % від традиційного підживлення синтетичними азотними добривами (N<sub>109</sub>).

Заміна в системі удобрення кукурудзи аміаку водного дигестатом дозою 10–20 м<sup>3</sup>/га підвищує чистий енергетичний прибуток на 37–46 %, а коефіцієнт енергетичної ефективності – з 1,4 до 3,2–3,7. Найнижчі енергетичні витрати (28 % від варіанту дослідів N<sub>ва200</sub>) забезпечує внесення під кукурудзу 75 % азоту у вигляді 15 м<sup>3</sup>/га дигестату та 25 % – аміаку водного. При цьому енергетична собівартість 1 т зерна знижується з 6,39 до 1,88 ГДж.

Господарствам різних форм власності Правобережного Лісостепу України для забезпечення сталого відновлення та поліпшення агрохімічних властивостей темно-сірого лісового ґрунту середньо суглинкового гранулометричного складу з низьким вмістом азоту легкогідролізованих сполук (за методом Корнфілда) та дуже високим – рухомими сполуками фосфору і калію (за методом Чирикова), забезпечення високої продуктивності сільськогосподарських культур рекомендується застосовувати рідкий дигестат на основі курячого посліду з вмістом 1,1 % азоту, 0,97 – P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> і 0,81 % K<sub>2</sub>O для ранньовесняного підживлення пшениці озимої дозою 10 м<sup>3</sup>/га, що замінить внесення синтетичних азотних добрив напровесні та на стадії ВВСН 28–29 загальною дозою азоту 109 кг/га та для осіннього внесення під кукурудзу в дозі 20 м<sup>3</sup>/га або в поєднанні з аміаком водним у відношенні за азотом 1 : 1 за дози N<sub>200</sub>.

**Ключові слова:** біогазова суспензія, дигестат, пшениця м'яка озима, кукурудза, добрива, курячий послід, макро- й мікроелементи, органічна речовина, властивості ґрунту, урожайність, якість зерна.

## ANNOTATION

O. V. Shevchuk. Agrochemical efficiency of biogas production by-products on grey forest soil of the Right-Bank Forest-Steppe of Ukraine. – Qualifying scientific work on manuscript rights.

Dissertation for the degree of Philosophy Doctor in 201 «Agronomy» speciality (20 – Agricultural Sciences and Food). – Uman National University, Uman, 2026.

Over the last decade, biogas production worldwide by anaerobic fermentation has increased significantly. At the same time, the number of related products of its production - digestates - has also increased. Return of organic plant and animal waste to the production cycle, where substrates are obtained in the biogas production (circular waste utilization), is promising for participation in the renewable energy cycle, and their use for fertilizer can have a positive effect on the climate, environment and sustainability of agricultural production.

It has been found that digestate has a high content of macro- and microelements per dry matter and can be a valuable fertilizer product, taking into account the fact that it needs to be disposed of at a short distance from the biogas plant. At the same time, each batch of digestate is a separate fertilizer which has a different macro- and microelement composition and organic matter content. It requires preliminary analysis. Based on the obtained results, it is possible to determine the permissible application doses for a particular crop. Nowadays, there are no restrictions on the sale of digestate as a fertilizer product of organic origin.

Research has established patterns of changes in the agrochemical state of the soil, possibilities of using liquid digestate for fertilizing soft winter wheat and corn at different application doses and in combination with mineral fertilizers, its effect on grain yield and quality and its pathogen contamination; agrochemical, economic and energy efficiency of its application has been shown; the prospects for the digestate use in soil fertility restoration measures have been assessed.

The conducted research solved a relevant scientific and applied problem in the modern development of agriculture with regards to the optimal combination of livestock and crop production. Returning digestate to the soil not only solves the



effective use of biogas production by-products, but also the triple task of restoring soil fertility, increasing crop productivity, and environmentally safe disposal. This ensures the implementation of sustainable development concept.

The agrochemical feasibility and effectiveness of using biogas production digestate from chicken manure as a fertilizer product for soft winter wheat and corn have been substantiated and practically proven. A solution to the issue of its environmentally safe utilization on the grey forest soil of the Right-Bank Forest-Steppe based on the results of agrochemical, microbiological and field research, determination of crop productivity indicators, agrochemical and economic efficiency have also been proposed. The peculiarities of growth and development of soft winter wheat and corn, as well as the regularities of their productivity formation depending on the use of different doses of digestate, have been established. The optimal doses of digestate application in agrocenoses of soft winter wheat and corn have been substantiated. It has been proven that yield increases and biochemical indicators of grain quality improve.

Nutrition management systems for soft winter wheat and corn in modern growing technologies have been improved, taking into account the impact of digestate on soil properties. The study of the possibility of environmentally safe utilization of by-products of anaerobic digestion of chicken manure in a biogas plant as a possible source of plant nutrition and organic matter in the soil in order to restore its biological functions have been further developed; technological approaches to their use as a fertilizer product, evaluation of their elemental composition have been improved; scientific provisions on increasing the productivity of soft winter wheat and corn through the use of a new type of organic fertilizer (digestate) with favourable microbiological and agrochemical properties.

An algorithm of actions and proposals for returning organic waste to the production cycle, in accordance with the main EU directives, has been developed. The use of chicken manure digestate as fertilizer, which contains a significant amount of organic matter and nutrients of various compositions, will help optimize their entry into the soil in order to increase yield and improve grain quality, restore

and improve soil quality, protect the environment and consumers, reduce dependence on synthetic fertilizers.

The chemical composition of chicken manure biogas production by-products was investigated and a relatively high content of organic matter and nutrients was found; therefore they can be used as bioorganic fertilizer products. Optimal doses of chicken manure digestate on grey forest soil in the conditions of the Right-Bank Forest-Steppe in the fertilizer systems of soft winter wheat and corn have been determined. This contributes to their productivity, restore soil fertility, reduce the use of artificial chemical fertilizers, the cost of agricultural production and environmental pollution by bird waste products. In the future, the use of biogas co-products will be increasingly used to promote the integrated combination of livestock and crop production and will contribute to the formation of low-carbon, sustainable and efficient agricultural production.

Practical recommendations for the digestate use have been developed. It has been established that early spring fertilization of winter wheat with liquid digestate at a dose of 10 m<sup>3</sup>/ha is advisable which will replace the application of synthetic nitrogen fertilizers with a total dose of 109 kg/ha of active ingredient in spring and at the stage of BBCH 28-29. Under this fertilization scenario, grain yield can be 7.64-8.68 t/ha with a protein content of 10.7-11.4% depending on weather conditions. Different combinations of digestate with mineral fertilizers were evaluated compared to the traditional fertilizer application system and the effectiveness of its application at a dose of 20 m<sup>3</sup>/ha or in combination with aqueous ammonia in a nitrogen ratio of 1:1 at a dose of N<sub>200</sub> has been established.

The doses of nitrogen application with different fertilizer products in feeding and the development stage of winter wheat plants significantly affect the nitrogen content of mineral compounds in the soil layer 0-40 cm. Fertilization with digestate, compared to nitrogen fertilizers, improves the nitrogen regime of the soil at the end of the winter wheat growing season.

Fertilization of winter wheat with nitrogen fertilizers (109 kg/ha of active ingredient) and digestate provides an increase in yield of 0.60-2.4 t/ha or by 10-41%

and decreases with an increase in the dose of digestate application from 10 to 20-30 m<sup>3</sup>/ha. At a digestate dose of 10 m<sup>3</sup>/ha, there is only a tendency to reduce grain yield compared to the production control (N<sub>109</sub>) by 0.31 t/ha or by 4%.

Feeding winter wheat with digestate in spring at doses of more than 30 m<sup>3</sup>/ha does not contribute to a significant increase in winter wheat yield. At a dose of 30 m<sup>3</sup>/ha, a significant increase in grain yield is ensured - 0.78 t/ha or 15% compared to the control without fertilizing, but at the same time it is inferior to production control with fertilizing crops with nitrogen mineral fertilizers at a dose of 109 kg/ha of active ingredient. Increasing the digestate dose to 50 and 70 t/ha did not significantly change grain yield compared to absolute control.

Early spring feeding of winter wheat with digestate at a dose of 10-30 m<sup>3</sup>/ha is not inferior in terms of its impact on grain quality indicators to the traditional system of fertilizing it with synthetic nitrogen fertilizers. With an increase in the digestate dose to 20 and 30 m<sup>3</sup>/ha, the protein yield per unit of sown area decreases by 16 and 42%, respectively, which is explained by a decrease in grain yield.

Feeding winter wheat with digestate at a dose of 10 m<sup>3</sup>/ha provides an intensity of nitrogen balance of 61.0%, phosphorus - 168.4% and potassium - 200.5% which indicates the need for additional nitrogen application. At the same time, the utilization rate of nitrogen from digestate is 82.6%, phosphorus - 32.6%, and potassium - 77.4%, and decreases at a dose of 30 m<sup>3</sup>/ha to 13.9%, 4.8%, and 22.0%, respectively.

Under different fertilizer systems, corn yield increases by 2.65-2.96 t/ha or by 46-51% compared to the yield in the control without fertilizers of 5.80 t/ha. When applying 10 m<sup>3</sup>/ha of digestate in combination with aqueous ammonia, there is a tendency to increase yield by 0.31 t/ha or by 12% compared to applying only digestate at a dose of 20 m<sup>3</sup>/ha.

Application of digestate to corn at a dose of 20 m<sup>3</sup>/ha compared to the production control of 200 kg/ha in the form of aqueous ammonia does not significantly change grain quality indicators. At the same time, there is a tendency of improving the grain unit and its protein content.

The most favorable balance of nitrogen, phosphorus and potassium in the soil, assuming that only corn grains are removed from the field - 68.0 kg/ha, 54.1 and 44.2 kg/ha, respectively, is formed by the fertilizer system Digestate 10 m<sup>3</sup>/ha+Nva and a total nitrogen dose of 200 kg/ha.

The lowest digestate consumption for the formation of 1 ton of winter wheat grain (4.6 m<sup>3</sup>) is provided by its spring feeding at a dose of 10 m<sup>3</sup>/ha. At the same time, 1 m<sup>3</sup> of digestate contributes to the formation of 216 kg of grain. The nitrogen fertilizer consumption for the formation of 1 ton of corn grain yield increase is 4% lower compared to the production control (N<sub>200</sub> in the form of aqueous ammonia) when combining digestate and aqueous ammonia in the fertilizer system in a ratio of 1:1 by nitrogen. At the same time, the payback of nitrogen increases by 11% compared to its application in the form of digestate at a dose of 20 m<sup>3</sup>/ha.

The use of digestate in the fertilization system of winter wheat and corn is economically viable and can replace expensive synthetic nitrogen fertilizers. In this respect, it is necessary to take into account, first of all, the costs of transporting digestate from the biogas plant to the field. The payback of 1 UAH of costs for different winter wheat fertilizer systems varies within 0.5-4.8 UAH and is the highest for feeding it with digestate at a dose of 10 m<sup>3</sup>/ha, even for its transportation over a distance of up to 56 km.

When applying 200 kg/ha of nitrogen to corn, the cost of grain yield increase varies from 20.1 thousand to 22.5 thousand UAH/ha, depending on the experiment variant, and is highest when applying 10 m<sup>3</sup>/ha of digestate in combination with aqueous ammonia in a nitrogen ratio of 1:1.

During early spring feeding of winter wheat with digestate at a dose of 10 m<sup>3</sup>/ha, the net energy gain is 30.35 GJ/ha, or 99% of the traditional fertilization with synthetic nitrogen fertilizers (N<sub>109</sub>).

Replacing ammonia in the corn fertilizer system with aqueous digestate at a dose of 10-20 m<sup>3</sup>/ha increases the net energy profit by 37-46%, and the energy efficiency coefficient from 1.4 to 3.2-3.7. The lowest energy costs (28% of the Nva200 experiment variant) are provided by applying 75% nitrogen under corn in

the form of 15 m<sup>3</sup>/ha of digestate and 25% of aqueous ammonia. Moreover, the energy cost of 1 ton of grain decreases from 6.39 to 1.88 GJ.

For farms of various forms of ownership in the Right-Bank Forest-Steppe of Ukraine to ensure sustainable restoration and improvement of agrochemical properties of dark-grey forest soil of semi-loam granulometric composition with a low nitrogen content of easily hydrolyzed compounds (according to the Kornfield method) and a very high content of mobile phosphorus and potassium compounds (according to the Chyrykov method), to ensure high productivity of agricultural crops, it is recommended to use liquid digestate based on chicken manure with a content of 1.1% nitrogen, 0.97% P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> and 0.81% K<sub>2</sub>O for early spring feeding of winter wheat at a dose of 10 m<sup>3</sup>/ha which will replace the application of synthetic nitrogen fertilizers in the spring and at the stage of BBCH 28–29 with a total nitrogen dose of 109 kg/ha and for autumn application under corn at a dose of 20 m<sup>3</sup>/ha or in combination with aqueous ammonia in a ratio of 1:1 nitrogen at doses of N<sub>200</sub>.

**Key words:** biogas suspension, digestate, soft winter wheat, corn, fertilizers, chicken manure, macro- and microelements, organic matter, soil properties, yield, grain quality.

## СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

### *Статті у фахових виданнях України*

Шевчук О. В., Господаренко Г. М. Використання рідкого дигестату біогазового виробництва для підживлення пшениці озимої. *Зб. наук. пр. Уманського НУС*. 2023. Вип. 103. Ч. 1. С. 18–26. DOI: 10.32782/2415-8240-2023-103-1-18-26. *(Особистий внесок Шевчука О. В.: аналіз літературних джерел, проведення польових і лабораторних досліджень, аналіз отриманих результатів, статистична обробка отриманих даних, обґрунтування висновків; внесок співавтора: аналіз літературних джерел).*

Шевчук О. В., Господаренко Г. М. Основні характеристики біогазового дигестату з курячого посліду. *Зб. наук. пр. Уманського НУС*. 2024. Вип. 104. Ч. 1. С. 19–32. DOI: 10.32782/2415-8240-2024-104-1-19-32. *(Особистий внесок Шевчука О. В.: проведено літературний науковий пошук, відбір і підготовку зразків, їх аналіз результатів і узагальнення; внесок співавтора: проведено концептуалізацію та планування дослідження, порівняльний аналіз наявних досліджень, які наближені до опублікованих та визначено відповідні узгодження і відмінності).*

Шевчук О. В., Господаренко Г. М. Порівняльна характеристика дигестату з іншими органічними добривами. *Вісник Уманського НУС*. 2025. №1. С. 42–48. DOI <https://doi.org/10.32782/2310-0478-2025-1-42-48> *(Особистий внесок Шевчука О. В.: аналіз літературних джерел, відбір і підготовка зразків, проведення лабораторних досліджень, статистичне опрацювання даних, обґрунтування висновків; внесок співавтора: аналіз літературних джерел, підготовка до публікації).*

Шевчук О. В., Господаренко Г. М. Ефективність підживлення пшениці озимої дигестатом. *Таврійський науковий вісник*. 2025. Вип. 142. Ч. 2. С. 160–168. DOI <https://doi.org/10.32782/2226-0099.2025.142.2.20> *(Особистий внесок Шевчука О. В.: аналіз літературних джерел, проведення польових і лабораторних досліджень, статистичне опрацювання даних, обґрунтування*

*висновків, підготовка до публікації; внесок співавтора: аналіз літературних джерел, узагальнення даних).*

Шевчук О. В., Господаренко Г. М. Ефективність дигестату в системі удобрення кукурудзи. *Зб. наук. пр. Уманського НУС*. 2025. Вип. 106. Ч. 1. С. 189–197. DOI: 10.32782/2415-8240-2025-106-1-189-197 (*Особистий внесок Шевчука О. В.: аналіз літературних джерел, проведення польових і лабораторних досліджень, статистичне опрацювання даних, обґрунтування висновків, підготовка до публікації; внесок співавтора: аналіз літературних джерел, узагальнення даних).*

#### *Матеріали науково-практичних конференцій*

Господаренко Г. М., Шевчук О. В. Перспективи використання на удобрення біогазової суспензії. *Матеріали Всеукраїнської науково-практичної конференції «Актуальні питання агротехнологій»*. (м. Умань, 27 жовтня 2022 р.). Умань : УНУС, 2022. С. 15–18. (*Особистий внесок Шевчука О. В.: аналіз літературних джерел, проведення польових досліджень, узагальнення даних, підготовка до публікації; внесок співавтора: обґрунтування висновків).*

Господаренко Г. М. , Шевчук О. В. Ефективність підживлення пшениці озимої рідким дигестатом. *Матеріали Міжнар. наук.-практ. конф. «Інновації у сучасному агропромисловому виробництві»* (Одеса, 21–22 вересня 2023 р.). Одеса, 2023. С. 251–255. (*Особистий внесок Шевчука О. В.: проведено концептуалізацію та планування дослідження, польовий дослід, відбір, підготовку і аналіз зразків, літературний науковий пошук, порівняльний аналіз наявних досліджень, їх аналіз та узагальнення; внесок співавтора: аналіз отриманих результатів, статистична обробка отриманих даних, участь в написанні статті).*

Шевчук О. В., Господаренко Г. М. Основні характеристики супутніх продуктів виробництва біогазу з курячого посліду. *Матеріали Міжнар. н.-п. конф. з нагоди 100-річчя від дня народження д. с.-г. н., проф., академіка Ф. Т. Моргуна, 90-річчя Агрономічного факультету ДДАЕУ та Міжнародного*

дня здоров'я рослин (Дніпро, 16–17 травня 2024 року). Дніпро: ДДАЕУ, 2024. С. 82–84. *(Особистий внесок Шевчука О. В.: аналіз літературних джерел, проведення відбору зразків і лабораторних досліджень, аналіз отриманих результатів, обґрунтування висновків; внесок співавтора: аналіз літературних джерел).*

Шевчук О. В., Господаренко Г. М. Вплив дигестату на якість зерна пшениці та збір білка. Інноваційні технології у рослинництві: матеріали міжнародної науково-практичної інтернет-конференції до 115-ої річниці з дня народження доктора сільськогосподарських наук, професора, член-кореспондента НАН України, Заслуженого діяча науки України Кияка Григорія Степановича (Львів-Дубляни, 30 квітня 2025 р.). [Електронний ресурс]. Львів-Дубляни: Львівський НУВМБ ім. С. З. Гжицького. Північний кампус, 2025. С. 159–162.

<https://repository.lnup.edu.ua/jspui/handle/123456789/2477> *(Особистий внесок Шевчука О. В.: аналіз літературних джерел, проведення польових і лабораторних досліджень, статистичне опрацювання даних, обґрунтування висновків, підготовка до публікації; внесок співавтора: аналіз літературних джерел, узагальнення даних).*

Шевчук О. В., Господаренко Г. М. Ефективність удобрення пшениці озимої і кукурудзи дигестатом. Зб. пр. учасників Міжнар. наук.-практ. конф. «Інноваційні технології в рослинництві та землеробстві». (Житомир, 3–4 квітні 2025 р.). Житомир, 2025. С. 90–96. *(Особистий внесок Шевчука О. В.: аналіз літературних джерел, проведення польових і лабораторних досліджень, статистичне опрацювання даних, обґрунтування висновків, підготовка до публікації; внесок співавтора: аналіз літературних джерел, узагальнення даних).*

Господаренко Г. М., Шевчук О. В. Вплив дигестату на формування продуктивності кукурудзи. Зб. пр. учасників Міжнар. наук.-практ. конф. «Інноваційні технології в рослинництві та землеробстві». (Житомир, 3–4 квітні 2025 р.). Житомир, 2025. С. 297–305. *(Особистий внесок Шевчука*



*О. В.: проведено літературний науковий пошук, польовий дослід, відбір, підготовку і аналіз зразків, узагальнення, статистичну обробку отриманих даних; внесок співавтора: порівняльний аналіз наявних досліджень, які наближені до опублікованих авторами та визначено відповідні узгодження та відмінності).*

Шевчук О. В., Господаренко Г. М. Перспективи використання супутніх продуктів виробництва біогазу в сучасних агротехнологіях. Тези Міжнар. наук.-практ. конф., яка присвячена 100-річчю проф. М. К. Шикіули «Ґрунтозахисні технології як фактор родючості ґрунтів і високих врожаїв». (Київ, 20–21 лютого 2025 р.). Київ, 2025. С. 86–88. *(Особистий внесок Шевчука О. В.: аналіз літературних джерел, проведення відбору зразків і лабораторних досліджень, аналіз отриманих результатів, обґрунтування висновків; внесок співавтора: аналіз літературних джерел).*

Шевчук О. В., Господаренко Г. М. Ефективність дигестату в системі удобрення кукурудзи. *Зб. наук. пр. Уманського НУС*. 2025. Вип. 106. Ч. 1. С. 189–197. DOI: 10.32782/2415-8240-2025-106-1-189-197 *(Особистий внесок Шевчука О. В.: аналіз літературних джерел, проведення польового дослід, відбір зразків і лабораторні дослідження, аналіз отриманих результатів; внесок співавтора: обґрунтування висновків).*

Шевчук О. Баланс основних елементів живлення в ґрунті під пшеницею озимою за різних доз внесення дигестату. *Тези Всеукр. наук.-практ. інтернет-конференції «Рубіновські читання», приуроченій 125-річчю від дня народження видатного вченого, професора Симона Самійловича Рубіна*. (Умань, 16 травня 2025 р.). Умань, 2025. С. 16–17.

Господаренко Г., Шевчук О. Енергетична ефективність застосування дигестату під пшеницю озиму та кукурудзу. *Збірник тез міжнародної інтернет-конференції «Наукове забезпечення виробництва конкурентоспроможної сільськогосподарської продукції в умовах формування екологічності агrolандшафтів»*. (Умань, 17 червня 2025 р.). Умань, 2025. С. 52–54. *(Особистий внесок Шевчука О. В.: аналіз літературних*

*джерел, проведення польового досліду, проведення розрахунків, аналіз отриманих результатів; внесок співавтора: обґрунтування висновків).*

Шевчук О. В., Господаренко Г. М. Ефективності застосування дигестату для удобрення польових культур. *Збірник тез Міжнародної науково-практичної конференції «Адаптація агровиробництва до змін клімату та ґрунтової родючості».* (с-ще Полігон, Миколаївської обл., 9 жовтня 2025 р.). ДУ «Миколаївська державна с.-г. дослідна станція ІКОСГ НААН», 2025. С. 90–92. *(Особистий внесок Шевчука О. В.: проведено концептуалізацію та планування дослідження, польові досліді, відбір, підготовку та аналіз зразків, літературний науковий пошук, порівняльний аналіз наявних досліджень, їх аналіз та узагальнення; внесок співавтора: аналіз отриманих результатів, участь в написанні статті).*

## ЗМІСТ

	Стор.
АНОТАЦІЯ .....	2
ЗМІСТ .....	19
ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ, ОДИНИЦЬ, СКОРОЧЕНЬ І ТЕРМІНІВ .....	22
ВСТУП .....	23
РОЗДІЛ 1 СУЧАСНИЙ СТАН, ПРОБЛЕМИ І ПЕРСПЕКТИВИ ЗАСТОСУВАННЯ НА УДОБРЕННЯ СУПУТНІХ ПРОДУКТІВ ВИРОБНИЦТВА БІОГАЗУ (огляд літератури).....	32
1.1 Потенціал ресурсів біогазового виробництва та екологічні проблеми утилізації його супутніх продуктів .....	34
1.2 Вплив супутніх продуктів виробництва біогазу на властивості грунту .....	50
1.3 Вплив супутніх продуктів виробництва біогазу на продуктивність сільськогосподарських культур .....	62
Висновки до розділу 1 .....	69
РОЗДІЛ 2 МЕТОДИКА ТА УМОВИ ПРОВЕДЕННЯ ДОСЛІДЖЕНЬ ..	72
2.1 Методика проведення досліджень .....	72
2.2 Кліматичні та агрометеорологічні умови .....	75
2.3 Ґрунтові умови .....	84
2.4 Агротехнологічні особливості вирощування культур .....	86
Висновки до розділу 2 .....	89

РОЗДІЛ 3 ФІЗИКО-ХІМІЧНІ ОСОБЛИВОСТІ СУПУТНІХ ПРОДУКТІВ ВИРОБНИЦТВА БІОГАЗУ ПОРІВНЯНО З ІНШИМИ ОРГАНІЧНИМИ ДОБРИВАМИ .....	91
3.1 Фізико-хімічна характеристика супутніх продуктів виробництва біогазу .....	91
3.2 Склад і порівняльна характеристика різних органічних добрив .....	107
Висновки до розділу 3 .....	109
РОЗДІЛ 4 ФОРМУВАННЯ ПРОДУКТИВНОСТІ ПШЕНИЦІ ОЗИМОЇ ЗАЛЕЖНО ВІД СИСТЕМИ УДОБРЕННЯ .....	110
4.1 Вплив високих доз дигестату на формування продуктивності пшениці озимої .....	114
4.2 Умови формування продуктивності пшениці озимої за різних систем удобрення .....	126
4.3 Винесення основних елементів живлення з урожаєм пшениці озимої за різних систем удобрення та їх баланс у ґрунті .....	135
Висновки до розділу 4 .....	141
РОЗДІЛ 5 ФОРМУВАННЯ ПРОДУКТИВНОСТІ КУКУРУДЗИ ЗАЛЕЖНО ВІД СИСТЕМИ УДОБРЕННЯ .....	144
5.1 Вміст хімічних елементів у рослинах кукурудзи залежно від доз внесення дигестату .....	148
5.2 Продуктивність кукурудзи за різних систем удобрення .....	153
5.3 Винесення основних елементів живлення кукурудзою та їх баланс у ґрунті .....	155
5.4 Вплив післядії дигестату на врожайність кукурудзи .....	162

Висновки до розділу 5 .....	164
РОЗДІЛ 6 АГРОХІМІЧНЕ, ЕКОНОМІЧНЕ ТА ЕНЕРГЕТИЧНЕ ОЦІНЮВАННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ЗАСТОСУВАННЯ ДИГЕСТАТУ ДЛЯ УДОБРЕННЯ .....	167
6.1 Агрохімічна ефективність .....	169
6.2 Економічна ефективність .....	172
6.3 Енергетична ефективність .....	175
6.4 Перспективи використання дигестату в сучасних агротехнологіях .....	178
Висновки до розділу 6 .....	192
ВИСНОВКИ .....	195
РЕКОМЕНДАЦІЇ ВИРОБНИЦТВУ .....	198
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ .....	199
ДОДАТКИ .....	245

## **ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ, ОДИНИЦЬ, СКОРОЧЕНЬ І ТЕРМІНІВ**

- BBCH (Biologische Bundesanstalt, Bundessortenamt & Chemical Industrial)  
– міжнародна система кодування фаз росту та розвитку рослин
- BBCH 21–29 – фаза куціння рослин
- BBCH 37–49 – фаза розвитку верхівкового листка
- BBCH 51–61 – фаза розвитку суцвіття (колосіння)
- ЕВА – Європейської біогазової асоціації
- N<sub>ва</sub> – аміак водний
- ssp. – скорочення від лат. species – вид; після родової назви
- V – коефіцієнт варіації
- $\sigma$  – стандартне відхилення
- ГДК – гранично допустима концентрація
- ГВК – ґрунтовий вбирний комплекс
- д. р. – діюча речовина
- ДР – державна реєстрація
- ЄС – Європейський союз
- КАА – крохмале-аміачний агар
- КУО – колонієутворювальні одиниці
- НААН – Національна академія аграрних наук України
- ННЦ «ІА» – Національний науковий центр «Інститут ґрунтознавства та агрохімії імені О. Н. Соколовського» ІА – пектиновий агар
- РОД – рідке органічне добриво
- C<sub>орг</sub> – вуглець органічних сполук
- ТОВ – товариство з обмеженою відповідальністю
- Уманський НУ – Уманський національний університет
- УНУ – Уманський національний університет

## ВСТУП

**Обґрунтування вибору теми дослідження.** Нині, у зв'язку зі зміною клімату, важливими проблемами людства є нестача продовольства та енергії, зміна природного середовища, втрати стійкості екосистем, зниження родючості ґрунтів. Вхід України в Європейський Союз зумовлює необхідність упровадження ефективних з екологічного, економічного та соціального поглядів систем ведення аграрного виробництва, розроблення високоефективних агротехнологій, у тому числі і раціонального застосування продуктів переробки відходів органічного походження, які будуть мати мінімальне хімічне навантаження на ґрунт.

За останнє десятиріччя виробництво біогазу у світі анаеробним бродінням зросло втричі. При цьому значно збільшилась кількість супутніх продуктів його виробництва – дигестатів [291, 359]. У багатьох країнах, у тому числі і в Україні, нині залишається невикористаним у повній мірі значний потенціал агропромислового комплексу для виробництва біопалив. Переробка органічної сировини на біопаливо дозволяє створити замкнутий цикл виробництва та зменшити кількість відходів і поліпшити екологічний стан довкілля [27, 327].

В Україні прийнято Закону «Про внесення змін до Закону України «Про альтернативні види палива» щодо розвитку виробництва біометану» № 5464 від 05.05.2021 р., що стало важливим кроком для стимулювання виробництва біометану [91].

Виробництво біогазу має низку переваг: зменшення залежності від імпортованих енергоносіїв, отримання додаткового прибутку від продажу електроенергії і тепла, вироблених з власної сировини, а також поліпшення родючості ґрунтів завдяки супутнім біоорганічним добривам [17].

Україна має найбільший у Європі біопродуктивний потенціал, що дозволяє задовольняти продовольчі потреби населення, так і виробляти велику кількість біосировини для виробництва біогазу. Збільшення світового попиту

на продукти харчування та корми тваринам значно впливає на створення біомаси для виробництва біогазу. Раціональне використання біомаси сприяє вирішенню триєдиного завдання: захисту довкілля, задоволенню енергетичних потреб і виробництво добривальних продуктів.

**Актуальність досліджень** – повернення органічних відходів рослин і тварин у виробничий цикл, де субстрати отримують у процесі виробництва біогазу (циркулярна утилізація відходів), є перспективним для участі в циклі відновлюваної енергії, а їх використання для удобрення може мати позитивний вплив на клімат, довкілля та сталість сільськогосподарського виробництва. Анаеробний дигестат є ефективним добривом завдяки вмісту в ньому легкодоступного азоту, а також фосфору, калію, магнію та інші елементів, органічних сполук різного складу. Властивості цього продукту, його вплив на ґрунт, урожайність сільськогосподарських культур та технологічні властивості зерна до кінця не вивчені і можуть відрізнятися від інших органічних і мінеральних добрив. Дослідження системи удобрення пшениці озимої і кукурудзи в умовах Правобережного Лісостепу України, у тому числі оцінювання формування врожайності та якості зерна не проводились. Використання анаеробного дигестату для удобрення, швидше за все, зменшить залежність від мінеральних добрив і допоможе розробити кліматично нейтральні технології вирощування сільськогосподарських культур.

Дигестат вважається високоефективним добривальним продуктом, що містить широкий спектр необхідних для рослин поживних речовин, багато органічних сполук та різні гормони росту, вітаміни тощо. Сприяння його застосуванню в землеробстві може зменшити забруднення довкілля значними відходами тваринництва, а також сприяти ефективному органічному поєднанню рослинництва і тваринництва, просуванню та застосуванню ефективних циклічних і низьковуглецевих агротехнологій.

Вже проведено багато дослідження щодо застосування дигестату на сільськогосподарських угіддях в багатьох країнах світу, але через різні



природно-кліматичні умови, особливості сільськогосподарських культур існують значні відмінності ефективності його застосування. Дигестат також має різні фізичні та хімічні властивості, що може спричинити зниження ефективності системи удобрення, пригнічення росту культур, зниження якості врожаю та інші негативні наслідки. Тому його застосування має бути адаптоване до місцевих умов. У проведених дослідженнях пшениця озима та кукурудза були використані як об'єкт дослідження для вивчення впливу різних доз біогазової суспензії на властивості ґрунту та формування врожаю та його якісних показників, що дозволяє сформулювати наукову основу для екологічнобезпечного застосування дигестату, поліпшення властивостей ґрунту, підвищення врожайності та якості зерна, а також реалізації сталого розвитку сільського господарства.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** Основу дисертації є матеріали науково-дослідної роботи, які входили до програми наукових досліджень Уманського національного університету «Збалансоване використання, прогноз і управління природним та ресурсним потенціалом агроєкосистем України» (2021–2025 рр., номер ДР 0121U112521) за тематикою кафедри агрохімії і ґрунтознавства «Забезпечення раціонального використання ґрунтових ресурсів та управління мінеральним живленням сільськогосподарських культур», де автор був безпосереднім виконавцем досліджень, як аспірант.

**Мета і завдання досліджень.** *Мета досліджень* – встановити закономірності зміни агрохімічного стану сірого лісового ґрунту Правобережного Лісостепу, можливості використання рідкого дигестату у вигляді органічного удобрювального продукту для удобрення пшениці м'якої озимої і кукурудзи за різних доз внесення та поєднання з мінеральними добривами, його впливу на врожай і якість зерна та зараження його патогенами; показати агрохімічну та економічну ефективності його застосування; оцінити перспективи використання дигестату у заходах відновлення родючості ґрунтів.

Методологією цих досліджень було визначено можливість використання дигестату для забезпечення рослин макро- та мікроелементами, підвищення родючості ґрунтів за вирощування пшениці озимої і кукурудзи.

Відповідно до поставленої мети вирішували такі **завдання**:

- Визначити закономірності зміни доступного для рослин мінерального азоту та його форм у ґрунті за підживлення пшениці озимої дигестатом.

- Визначити вплив інтенсивності підживлення дигестатом на закономірності формування врожаю пшениці озимої, засвоєння елементів живлення та порівняти з ефективністю мінеральних азотних добрив.

- Оцінити якість і технологічні властивості зерна пшениці озимої і кукурудзи за різних доз дигестату та порівняти з ефективністю мінеральних азотних добрив.

- Проаналізувати процеси утворення та поведження з різними видами супутніх продуктів біогазового виробництва, які можуть використовуватися в якості добрив.

- Визначити хімічний склад супутніх продуктів біогазового виробництва та оцінити їх агрохімічні властивості, переваги і недоліки їх екологічні ризики застосування порівняно з іншими традиційними видами органічних добрив.

- Встановити вплив внесеного дигестату на властивості ґрунту, зокрема на поживний режим і біологічну активність.

- Визначити вплив удобрення дигестатом на показники росту та розвитку рослин пшениці м'якої озимої і кукурудзи.

- З'ясувати вплив застосування дигестату та його поєднання з мінеральними добривами на формування врожайності та якості зерна пшениці озимої і кукурудзи.

- Встановити агрохімічну та економічну ефективності запропонованих заходів із застосування дигестату для удобрення с.-г. культур.

*Об'єкт досліджень* – агрохімічна цінність супутніх продуктів біогазового виробництва та їх вплив на властивості ґрунту, показники росту та розвитку рослин, урожайність та якість зерна пшениці м'якої озимої і кукурудзи.

*Предмет дослідження* – удосконалення системи удобрення пшениці м'якої озимої і кукурудзи в умовах Правобережного Лісостепу застосуванням супутніх продуктів біогазового виробництва.

**Методи досліджень.** Для реалізації визначених завдань дослідження використано загальнонаукові та спеціальні для аграрної науки методи, спрямовані на отримання достовірних результатів: польові (метод спостережень, відбирання зразків ґрунту та рослин, визначення показників росту й розвитку рослин і врожайності зерна), лабораторні (підготовка відібраного матеріалу для аналізування, визначення фізико-хімічних, агрохімічних і біологічних показників родючості ґрунту, біохімічного складу зерна; мікробіологічний (для оцінювання мікробіологічного стану ґрунту), аналітичні (аналіз процесу формування продуктивності пшениці м'якої озимої і кукурудзи залежно від удобрення та взаємозв'язків між ними), інформаційні (огляд заходів, що досліджувалися в науковій літературі, оброблення та поширення наукової інформації), математичної статистики (підготовка одержаних експериментальних даних до аналізу, дисперсійний, кореляційний і регресійний аналізи), а також агрохімічний і економічний.

**Наукова новизна одержаних результатів** полягає у вирішенні актуального науково-прикладного завдання в сучасному розвитку сільського господарства, оптимальному поєднанню галузей тваринництва й рослинництва як основи проведених досліджень. Повернення в ґрунт дигестату не лише вирішує ефективне використання супутніх продуктів біогазового виробництва, але й триєдине завдання – відновлення родючості ґрунту, підвищення продуктивності сільськогосподарських культур, екологічно безпечна утилізація, що відповідно забезпечує реалізацію концепції сталого розвитку.

*Вперше* науково обґрунтовано і практично доведено агрохімічну доцільність й ефективність застосування дигестату біогазового виробництва з курячого посліду як удобрювального продукту під пшеницю м'яку озиму та кукурудзу, а також запропоновано вирішення питання еколого безпечної його

утилізації на сірому лісовому ґрунті Правобережного Лісостепу за результатами агрохімічних, мікробіологічних та польових досліджень, визначення формування показників продуктивності культур, агрохімічної і економічної ефективності. Встановлено особливості росту й розвитку пшениці м'якої озимої і кукурудзи, закономірності формування їх продуктивності залежно від застосування різних доз дигестату на основі курячого посліду. Обґрунтовано оптимальні дози внесення дигестату в агроценозах пшениці м'якої озимої і кукурудзи. Доведено, що при цьому підвищується врожайність і поліпшуються біохімічні показники якості зерна пшениці м'якої озимої і кукурудзи.

*Удосконалено* системи управління живленням пшениці м'якої озимої і кукурудзи у сучасних технологіях вирощування з урахуванням впливу дигестату на агрохімічні та інші властивості сірого лісового ґрунту, характеру трансформації в ньому органічних речовин, поживного режиму та біологічної активності.

*Набули подальшого розвитку:* вчення про можливість екологічно безпечної утилізації супутніх продуктів анаеробного зброджування курячого посліду в біогазовій станції як можливого джерела живлення рослин і органічних речовин у ґрунті з метою відновлення його біологічних функцій; удосконалено технологічні підходи їх застосування як удобрювального продукту, оцінювання їхнього елементарного складу; наукові положення щодо підвищення продуктивності пшениці м'якої озимої і кукурудзи завдяки використанню нового виду органічних добрив (дигестату) зі сприятливими мікробіологічними і агрохімічними властивостями.

**Практичне значення отриманих результатів** полягає в розробленні алгоритму дій та пропозицій щодо повернення органічних відходів у виробничий цикл відповідає основним директивам ЄС. Використання анаеробного дигестату з курячого посліду для удобрення, який містить значну кількість органічних і поживних речовин різного складу, допоможе оптимізувати надходження їх у ґрунт з метою підвищення врожайності та

поліпшення якості зерна, відновлювати і підвищувати якість ґрунту, захищати довкілля та споживачів, зменшувати залежність від синтетичних добрив.

Досліджено хімічний склад супутніх продуктів біогазового виробництва з курячого посліду і встановлено порівняно високий вміст органічної речовини і поживних речовин, тому вони можуть застосовуватися як біоорганічні удобрювальні продукти. Визначено оптимальні дози дигестату на основі курячого посліду на сірому лісовому ґрунті в умовах Правобережного Лісостепу в системах удобрення пшениці м'якої озимої і кукурудзи, що сприяє підвищенню їх продуктивності, відновленню родючості ґрунту, зменшенню використання штучних хімічних добрив, вартості сільськогосподарського виробництва та забруднення довкілля продуктами життєдіяльності птахів. У майбутньому використання супутніх продуктів біогазового виробництва буде все більше використовуватися для просування інтегрованого поєднання тваринництва та рослинництва і сприятиме формуванню низьковуглецевого, сталого та ефективного сільськогосподарського виробництва.

Вперше було вивчено та оцінено вплив застосування дигестату на властивості ґрунту та сільськогосподарські культури (пшеницю м'яку озиму і кукурудзу), дістали подальший розвиток наукові основи його застосування. На основі цього розроблено практичні рекомендації застосування дигестату. Встановлено, що доцільним є ранньовесняне підживлення пшениці озимої рідким дигестатом дозою  $10 \text{ м}^3/\text{га}$ , що замінить внесення синтетичних азотних добрив загальною дозою  $109 \text{ кг}/\text{га}$  д. р. наповесні та на стадії ВВСН 28–29. За такого сценарію удобрення врожайність зерна може становити  $7,64\text{--}8,68 \text{ т}/\text{га}$  за вмісту білка  $10,7\text{--}11,4 \%$  залежно від погодних умов. Оцінено різне поєднання дигестату з мінеральними добривами порівняно з традиційною системою застосування добрив і встановлено ефективність його внесення в дозі  $20 \text{ м}^3/\text{га}$  або в поєднанні з аміаком водним у відношенні за азотом  $1 : 1$  за дози  $\text{N}_{200}$ .

Рекомендації щодо застосування дигестату пройшли виробничу перевірку та впроваджено в агрофірмі «Колос» м. Ладизин Вінницької області

на площі 110 га (пшениця озима) та 145 га (кукурудза) (акт від 29.09.2025 р.) (додаток А.1), а також результати дисертаційної роботи впроваджуються/використовуються у навчальному процесі та науково-дослідній роботі в Уманському НУ (акт від 16.09.2025 р.) (додаток А.2), а саме студентів освітніх рівнів бакалавр і магістр. Зокрема в освітньому процесі застосовуються напрацювання здобувача щодо застосування дигестату з курячого посліду в системах удобрення польових культур, що дозволяє замінити промислові мінеральні добрива та зберегти родючість ґрунту в сучасних умовах зміни клімату. Це сприятиме поглибленню знань здобувачів вищої освіти щодо виробництва та застосування органічних добрив і гармонізації цього процесу з європейськими принципами.

**Особистий внесок здобувача.** Дисертаційна робота та наукові положення, що виносяться на захист, було отримано під час проведення науково-дослідної роботи автора. Особистим внеском є формування мети і завдань досліджень, аналіз та узагальнення даних з наукової літератури, виборі методів і методик виконання польових і лабораторних досліджень, збиранні, опрацюванні та статистичній обробці отриманих результатів, розрахунках ефективності, підготуванні матеріалів до написання наукових праць, а також у формуванні висновків і обґрунтуванні пропозицій та їх демонстрації й практичному впровадженні у виробництво.

Одержані результати належать здобувачу та є його науковим доробком. Публікації за темою дисертації підготовлено самостійно та у співавторстві (додаток Б). Зі спільних наукових праць здобувачу належить власні ідеї, результати досліджень і лабораторних аналізів. Внесок здобувача в публікаціях складає 80–100 %. У працях, які опубліковані у співавторстві, частка авторства здобувача полягає у плануванні та виконанні експериментальних досліджень, узагальненні та опрацюванні результатів, підготовці рукописів до друку.

**Апробація результатів дисертації.** Основні положення, результати виконаних досліджень і висновки роботи упродовж 2021–2025 рр.

доповідались і обговорювались на засіданні кафедри агрохімії і ґрунтознавства та наукових конференціях науково-педагогічних працівників Уманського НУ (Умань, 2022–2025), Всеукраїнській науково-практичній конференції «Актуальні питання агротехнологій» (Умань, 2022), Міжнародній науково-практичній конференції «Інновації у сучасному агропромисловому виробництві» (Одеса, 2023), Міжнародній науково-практичній конференції з нагоди 100-річчя від дня народження д. с.-г. н., проф., академіка Ф. Т. Моргуна, 90-річчя Агрономічного факультету ДДАЕУ та Міжнародного дня здоров'я рослин (Дніпро, 2024), Міжнародній науково-практичній інтернет-конференції «Інноваційні технології в рослинництві», присвяченій 115-ій річниці з Дня народження д. с.-г. н., проф., чл.-кор. НАН України, Заслуженого діяча науки України Кияка Г. С. (Дубляни, 2025), Міжнародній науково-практичній конференції «Інноваційні технології в рослинництві та землеробстві» (Житомир, 2025), Міжнародній науково-практичній конференції, яка присвячена 100-річчю проф. М. К. Шикuli «Ґрунтозахисні технології як фактор родючості ґрунтів і високих врожаїв» (Київ, 2025), Всеукраїнській науково-практичній інтернет-конференції «Рубіновські читання», приуроченій 125-річчю від дня народження видатного вченого, професора Симона Самійловича Рубіна. (Умань, 2025), Міжнародній науково-практичній конференції «Адаптація агровиробництва до змін клімату та ґрунтової родючості» (с-ще Полігон, Миколаївської обл., 2025).

**Публікації.** Основні матеріали і висновки дисертаційного дослідження опубліковано в 15 наукових працях, з яких п'ять статей у фахових наукових виданнях України і 10 праць у матеріалах конференцій. Частина даних, використаних у дисертації, взята з наукових статей здобувача О. В. Шевчука.

**Обсяг і структура дисертації.** Дисертаційну роботу викладено на 253 сторінках комп'ютерного тексту, в тому числі 192 – основного тексту, що складається з анотації, списку скорочень, вступу, шести розділів, висновків і рекомендації виробництву. Містить 31 таблицю, 5 рисунків і 6 додатків. У списку використаних джерел 426 найменувань, із яких 234 – латиницею.

## **РОЗДІЛ 1**

### **СУЧАСНИЙ СТАН, ПРОБЛЕМИ І ПЕРСПЕКТИВИ ЗАСТОСУВАННЯ НА УДОБРЕННЯ СУПУТНІХ ПРОДУКТІВ ВИРОБНИЦТВА БІОГАЗУ (огляд літератури)**

Зі зростанням населення світу та зменшенням земельних ресурсів подальша інтенсифікація сучасного сільськогосподарського виробництва неминуча [199]. Застосування мінеральних добрив сприяло підвищенню врожайності завдяки забезпеченню сільськогосподарських культур азотом і фосфором, які є лімітувальними чинниками росту. Однак надмірне їх використання нині піддається критиці та пов'язується з незворотними наслідками для довкілля [161].

У зв'язку з високою концентрацією ксенобіотиків і стійкістю до розкладання, самоочищення природного середовища проходить повільно. Тому його відновлення є актуальним екологічним завданням: раціональне перероблення сільськогосподарських відходів, відновлення та поліпшення родючості ґрунтів, уникнення надходження в них токсичних хімічних речовин, тощо. Серед наведених екологічних проблем є й утилізація супутніх продуктів біогазового виробництва. Європейська комісія прийняла новий план дій для створення в ЄС циркулярної економіки [254]. Повторне використання ресурсів із потоків відходів є частиною концепції циркулярної економіки і сприяє уникненню втрат матеріалів і поживних речовин. Таким чином можна зменшити попит на енергію, шкоду довкіллю та потребу в ресурсах для виробництва добрив [189]. Застосування біологічних добрив, вироблених з багатих поживними речовинами супутніх потоків, є одним зі способів повторного використання поживних речовин [227].

Все більше вивчається вплив різних видів добрив (мінеральних і органічних) на якість врожаю. Проте доступність нових інноваційних технологій для аграріїв залишається обмеженою. Біологічні добрива зазвичай



отримують із потоків біовідходів, таких як харчові відходи, осад стічних вод та сільськогосподарські відходи, які можуть містити рослинні залишки і тваринний гній [227]. Основними виробничими процесами для виробництва біологічних добрив є компостування, анаеробне зброджування, спалювання та піроліз [227].

Нині значно збільшилася кількість зацікавлених товаровиробників технологіями виробництва біогазу, значення яких зростає з двох основних причин: 1) виробництво біогазу для отримання енергетичної незалежності та більшої прибутковості виробництва; 2) супутні продукти біогазової технології (дигестат) можна використовувати як органічне добриво [174]. Нині біопаливо в Україні розглядається як вагома альтернатива традиційному пальному. Розвиток біоенергетики дає можливість розширити діапазон доступних джерел енергії, сприяти енергетичній незалежності держави і поліпшити стан довкілля [106, 235, 299].

Біологічна технологія гідролізу органічних твердих речовин передбачає зменшення кількості патогенів, стабілізацію відходів і відновлення енергії виробництвом біогазу з супутньої продукції тваринництва. Органічний вуглець видобувається як відновлюваний біогаз і використовується в комбінованому циклі виробництва тепла та електроенергії, тоді як поживні речовини (N, P, K) можна вносити у ґрунт як добрива [415].

За виробництва біогазу та біоетанолу зростає кількість органічної речовини тваринного та/або рослинного походження, що розкладається бактеріями у анаеробному середовищі [352]. Наприкінці виробничого процесу залишається оброблена біомаса – дигестат [352]. У процесі проходження дигестатом різних стадій трансформації йому стають властиві певні характеристики. Крім того, зберігання дигестату приводить до розповсюдження несприятливого газоповітряного середовища, забруднення ґрунту та підземних вод токсичними складовими. Утилізація дигестату пов'язана також з великими обсягами переробки біля населених пунктів.

Його заборонено складувати без спеціальних дозволів та умов, не можна захоронювати на звичайних полігонах побутових відходів [74].

У регулюванні якості добрив важливу роль відіграють категорії складових (СМС – categories of material components). Ними класифікують різні матеріали, що використовуються для їх виробництва, чим гарантується, що кожна складова відповідає визначеним стандартам безпеки та якості. У Додатку II Регламенту описано 15 категорій СМС [349], які охоплюють речовини і суміші первинних матеріалів (СМС 1), а також рослинні або інші оброблені біологічні матеріали (СМС 2–6) і матеріали, отримані з відходів (СМС 12–15). Згідно цієї класифікації супутній продукт виробництва біогазу з курячого посліду відноситься до СМС 5 – дигестат, відмінний від дигестату зі свіжої рослинної сировини. Тому, нами використовується термін «дигестат», як узагальнений для супутніх продуктів, які утворюються під час виробництва біогазу з курячого посліду. При цьому необхідно зазначити що в літературі, як вітчизняній, так і зарубіжній супутні продукти біогазового виробництва позначаються різними термінами: *біогазовий шлам, біогазовий дигестат, анаеробний дигестат, біогазовий гній, біогазове добриво, біогазова суспензія, суспензія біогазу, органо-біоактивне добриво, побічний продукт біогазового виробництва, супутній побічний продукт біогазу, дигестат «Флюент», переброджений шлам, рідкі дигастати – фугати, рідке органічне добриво.*

### **1.1 Потенціал ресурсів біогазового виробництва та екологічні проблеми утилізації його супутніх продуктів**

Зміна клімату стала однією з глобальних проблем у світі. Україна підписала нову Кліматичну Угоду, яка передбачає уповільнення темпів зростання температури повітря, зменшення викидів парникових газів заміною традиційних джерел енергії відновлювальними, серед яких важливе місце займає біоенергетика [348].

Глобальна енергетична та екологічна кризи змушують країни впроваджувати нові засоби виробництва енергії, які не завдають шкоди довкіллю. Альтернативні види палива – це «біологічно відновлювальна речовина органічного походження, що зазнає біологічного розкладання (відходи сільського господарства (рослинництва і тваринництва), лісового господарства та технологічно пов'язаних з ним галузей промисловості, а також органічна частина промислових та побутових відходів» [90].

Згідно стратегії Європейського зеленого курсу частка відновлюваної енергетики завдяки використанню біомаси рослинного і тваринного походження становить 10 % від всього енергетичного балансу [253]. Відновлення вмісту поживних речовин у ґрунті особливо важливо під час кризи застосування мінеральних добрив, коли сировина закінчується, а витрати на енергію для їх виробництва досягають досить високого рівня. Промислова фіксація азоту атмосфери є енергоємною [316], а виробництво фосфорних добрив залежить від невідновлюваних родовищ корисних копалин [360]. Це призводить до гострої потреби у пошуку альтернативних удобрювальних продуктів. Перероблені поживні речовини з міських органічних відходів, харчової промисловості чи сільськогосподарського виробництва можуть стати їх альтернативним джерелом. Застосування дигестату у країнах ЄС до 2030 р. може замінити 11 % азоту мінеральних добрив, а до 2050 р. – близько 30 %. Відповідно промислові фосфорні добрива можуть бути замінені до 32 % і до 2050 р. до 86 %. Необхідно зазначити, що в 2023 р. виробництво дигестату в Україні досягло 2 млн т.

Сільськогосподарське виробництво повинно здійснюватися відповідно до вимог охорони довкілля. Важливо сприяти безпечному використанню добрив, особливо азотних. Щорічно в ЄС виробляється близько 180 млн т дигестату анаеробного розкладання, більша частина якого використовується як органічне добриво [231]. В Європі працює майже 19 тис. біогазових установок. За даними Європейської біогазової асоціації (ЕВА), продуктивність біогазових / біометанових установок у Європі до 2050 року зросте в чотири рази [253].

Витрати на захоронення органічних матеріалів і обмежена доступність природного газу зробили біогазові установки привабливою альтернативою [234]. Традиційно дигестат вважається супутнім продуктом, який використовується як добриво в сільськогосподарському виробництві.

Дигестат за виробленими обсягами товарної продукції біогазових станцій є першому місці. У результаті метанового бродіння органічних речовин у біогазових установках утворюється 10 % газу від закладеної біомаси, а з решти 90 % утворюється дигестат [26]

Виробництво біогазу та застосування дигестату може значно скоротити викиди парникових газів і посилити секвестрації вуглецю в ґрунті, тоді як мінеральні добрива отримуються за енергоємного процесу. За використання дигестату парникові викиди зменшуються приблизно на 67 % [111].

Нині основними регіонами виробництва біогазу є Європа, Китай і США. Німеччина має дві третини європейських біогазових установок. Деякі країни (Великобританію, Францію, Швейцарію, Данію та Нідерланди та ін.) також пришвидшили розвиток біогазової промисловості [279].

Поряд зі збільшенням кількості біогазових установок, збільшується і виробництво дигестату. Рідкі дигестати містять більше азоту мінеральних сполук (зазвичай 5–6 % на суху речовину) і менше органічного вуглецю, ніж вхідний матеріал, а відношення C : N у дигестаті майже в десять разів нижче, ніж у гноєві [331]. Виробництву біометану в Україні сприяє наявний значний сировинний потенціал аграрного сектору національної економіки [26]. Як зазначається [163], використання біогазових установок вирішує проблему утилізації відходів, поліпшення екологічної ситуації, підвищення родючості ґрунтів, зменшення енергетичної залежності та розвитку регіональної економіки.

За даними Біоенергетичної асоціації, Україна може виробляти за рік до 10 млрд м<sup>3</sup> біометану з агробіомаси, а також із побутових відходів, тощо [270].

Дигестат, або органічний субстрат після ферментації у біогазових станціях, утворюється як супутній продукт в анаеробних умовах і вважається

одним із найцінніших видів органічних добрив [171, 245, 297]. Залишки анаеробного перетравлення – це продукти з різних джерел органічної сировини, до яких належать очисні системи, рослинний мул, відходи агрохарчової промисловості (частина твердих побутових відходів, включаючи нетоварну частину фруктів і овочів, харчові та кухонні відходи), зелені відходи (сільськогосподарські та садові відходи), відходи тваринного походження (гній свинячий, ВРХ тощо) та низка інших відходів [200, 211, 333]. Перетравлений продукт багатий на поживні речовини і може забезпечити їх значну частину, що необхідна рослинам упродовж вегетаційного періоду, а також поліпшити агрофізичні та біологічні показники ґрунту. Він сприяє зменшенню накопичення відходів і ефективнішому використанню наявних ресурсів. Тому вигода полягає не лише у вирішенні екологічних проблем, але й у роботі ферм у економному циклічному обігу або наближенні їх до роботи відповідно до умов охорони довкілля [196].

В якості сировини для отримання дигестату в процесі виробництва біогазу можуть використовуватися як органічні агропромислові або побутові відходи, так і рослинна сировина [23,274]. Біомаса характеризується такими фізико-хімічними показниками, як: вологість, вміст сухої речовини, вміст органічної сухої речовини, кислотність (рН), вміст білків, вуглеводів і жирів. У процесі зброджування мікроорганізмами на неї діють: температура, вологість середовища, рівень рН, відношення С : N : P, площа поверхні часточок сировини, частота подачі субстрату, уповільнювальні та стимулювальні домішки. Від цих показників залежить час зброджування, кількість одержуваного біогазу та його склад і властивості майбутнього біодобрива – дигестату.

Для отримання дигестату можуть використовуватися будь-які органічні відходи, придатні для виробництва біогазу: гній, пташиний послід [126,149, 150], зерно, меляса, післяспиртова й пивна дробина, буряковий жом, фекальні стоки, відходи рибного та забійного цеху (кров, жир, нутрощі), трава, побутові відходи органічного походження, відходи

молокозаводів – солоні та солодкі молочні відвійки, відходи від виробництва біоетанолу, біодизеля, технічний гліцерин, відходи від виробництва соків – жом фруктовий, ягідний, овочевий, виноградні вижимки, водорості, відходи виробництва крохмалю та патоки – мезга і сироп, відходи переробки картоплі, шкурки, гнилі бульби [129], макуха, силос, барда, буряки, гичка, клітковина, крохмаль і патока, флотаційний шлам (осад), зневоднений флотаційний шлам (осад) з міських заводів, що займаються очищенням стічних вод та інше [144]. Дослідження щодо використання різних органічних решток і тваринних відходів у якості субстратів проводилися багатьма вченими [251, 329, 339]. Зазвичай для виробництва біодобрива (дигестату) використовується гній ВРХ, свинячий гній і пташиний послід, оскільки основні бактерії, що виробляють метан, вже містяться в шлунку тварин і птахів. Відомо понад 50 видів метаногенів, які поділяють на три класи – *Methanobacteria*, *Methanococci* і *Methanopyri* [Biogas Digest.]. Нині майже весь біогазовий потенціал сконцентровано на сільськогосподарській сировині і лише незначна частина (до 10 %) на промислових і комунальних відходах. Найкращими видами сировини для біогазових електростанцій є відходи ферм і сільськогосподарських підприємств (силос, жом, гній, підстилка тощо), стічні та побутові води, відходи зі звалищ [357].

З економічного погляду використання гною як моносубстрату для виробництва біогазу й дигестату зазвичай є недоцільним і потребує добавляння рослинних решток [49, 398]. Крім силосу кукурудзи, використовують також силос сорго, буряку цукрового, конюшину, свічграс, тритикале [49, 171, 412], соняшник, міскантус, коноплі [49], солому, бадилля [154], листя [125]. Крім того, добавляння в послід торфу, тирси, лігніну або соломи суттєво знижує втрати азоту [151, 154]. Існує низка речовин, які можуть гальмувати або й зовсім припинити розвиток мікроорганізмів під час анаеробного зброджування: пральні порошки, важкі метали, антибіотики, хіміотерапевтичні та дезінфікувальні засоби, сполуки сірки, ефірні масла, кислоти, ціаніди, таніни, тощо. Важливими для бактерій є

мікроелементи – нікель, кобальт, молібден, вольфрам, залізо, особливо для формування ензимів. Їх дефіцит у зброджувальному субстраті може бути викликаний утворенням із сіркою стійких сульфідів [190].

Дигестат багатий на органічні речовини, азот і фосфор та інші елементи живлення. За неправильної утилізації проходить не тільки марна витрати поживних ресурсів, але й виникає ризик забруднення ґрунту, поверхневих і підземних вод [418, 300].

Основна мета економіки замкнутого циклу та сталого розвитку сучасного світу є раціоналізація використання природних ресурсів, що передбачає вторинну переробку матеріалів і відходів у корисні продукти. Це зазвичай спрямовано на поліпшення довкілля та зменшення кількості відходів, що, у свою чергу, зменшує використання природних ресурсів [362].

Для забезпечення бездефіцитного балансу гумусу в ґрунтах і їх розкислення нагальним завданням є зміна системи мінералізації з переорієнтацією на збільшення частки органічних добрив [133, 156].

Одним зі шляхів вирішення проблеми деградації ґрунтів в Україні є використання в якості органічного добрива дигестату. Ця субстанція близька за хімічним складом до компосту, тому може застосовуватися як удобрювальний продукт для відновлення та підвищення родючості ґрунтів.

Органічні удобрювальні продукти складаються з речовин тваринного та рослинного походження з яких під час розкладання утворюють мінеральні речовини. При цьому в приземний шар виділяється діоксид вуглецю, необхідний рослинам для фотосинтезу. Крім того, органічні продукти поліпшують водне й повітряне живлення рослин, сприяють розвитку ґрунтових мікроорганізмів, які живуть у симбіозі з кореневими системами рослин і допомагають їм отримати доступні поживні речовини [51, 417].

Виробництво дигестату сприяє зменшенню або й уникненню екологічних ризиків. Його можна використовувати як ресурс для зменшення внесення синтетичних мінеральних добрив і пом'якшення їх вплив на довкілля [409]. Зазвичай спосіб валоризації біомаси залежить виду сировини і її хімічного

складу [336]. Для багатьох видів органічної сировини анаеробне зброджування є найбільш економним способом утилізації. Це важливо, оскільки неконтрольовані викиди метану підсилюють глобальне потепління [106].

Розвиток технічного прогресу, що спрямований на підвищення енергозброєності та поліпшення комфортних умов праці та побуту людини, зазвичай призводить до порушення природних процесів, виснаження біотичного потенціалу екосистем. Тому актуальним є вивчення взаємозв'язку антропогенної діяльності та природних біотичних процесів у ґрунті за різних рівнів інтенсивності [153].

Нині основною метою будівництва біогазових установок є виробництво енергії і скорочення неконтрольованих викидів. Зменшення неприємного запаху після бродіння також є важливим аргументом для агровиробників, чийі землі розташовані в густозаселених районах. Це може спонукати їх до збільшення поголів'я худоби на фермі.

Важливою перевагою процесу анаеробного зброджування є його гнучкість і можливість застосування майже всіх видів органічних матеріалів, перш за все використання відновлюваних джерел енергії, що зазвичай є відходами. Це сприяє створенню екологічних ефектів під час їх транспортування, зберігання та використання [108]. Відновлювані джерела енергії є найдешевшою енергією в Україні [18]. З огляду останніх досягнень у виробництві біогазу з використанням агропромислових відходів наголошується, що це може зменшити викиди парникових газів і вирішити низку екологічних проблем [239].

В анаеробному процесі утворення біогазу беруть участь сотні видів мікроорганізмів [410]. При цьому в близько 50 % розщеплень органічних сполук беруть участь бактерії з аеробними або факультативно аеробними вимогами й не реагують на кисень. Світло уповільнює процес анаеробного зброджування [13]. Виробництво дигестату і стабільність процесів анаеробного зброджування залежить від складу сировини, умов процесу та активності мікробних колоній у системі [340]. Кількісний і якісний склад мікрофлори



залежить від складу органічного субстрату та умов зовнішнього середовища. Під час виробництва біогазу та утворення дигестату відбувається розкладання біомаси у результаті хіміко-фізичних процесів і симбіотичної життєдіяльності трьох основних груп бактерій. При цьому продукти метаболізму одних груп бактерій є продуктами живлення інших у певній послідовності [24]. Перша група – гідролізні, друга – кислотоутворювальні, третя – метаноутворювальні бактерії. Переважає гідролітична, бродильна, синтетична та метаногенна мікрофлора, яка послідовно здійснює стадії анаеробного бродіння [235].

Процес розкладання сировини умовно можна поділити на чотири етапи: гідроліз, ацидогенез, ацетогенез і метаногенез. На кожному етапі діють різні групи факультативних або обов'язкових анаеробних мікроорганізмів [154].

Спочатку під дією мікроорганізмів високомолекулярні органічні сполуки руйнуються до низькомолекулярних жирних кислот і спиртів. Потім вони окиснюються ацетогенними бактеріями до органічних кислот [342]. На етапі гідролізу аеробні бактерії перебудовують високомолекулярні органічні сполуки (білок, вуглеводи, жири, целюлозу) за допомогою ензимів на низькомолекулярні (цукор, амінокислоти, жирні кислоти і воду). Цей процес проходить відносно повільно і залежить від низки позаклітинних ензимів, як, наприклад, амілази, протеази, ліпази, рівня рН (4,5–6,0) і часу бродіння в резервуарі. Потім розщеплення (окиснення) проходить кислотоутворювальними бактеріями за участю анаеробних бактерій, які поглинають залишки кисню і таким чином утворюють необхідні для метанових бактерій анаеробні умови. За рівня рН 6,0–7,5 виробляються в першу чергу нестійкі жирні кислоти (оцтова, мурашина, масляна, пропіонова), низькомолекулярний етанол і гази – діоксид вуглецю, сірководень і аміак. Ці сполуки, а також органічний субстрат є додатковою поживою для розвитку метаноутворювальних бактерій (метаногенів), які здійснюють кінцеву стадію бродіння – синтез метану [192]. При цьому оптимальне відношення вуглецю до азоту повинно бути від 30 : 1 до 10 : 1. Якщо воно знижується до рівня

8 : 1, то надлишок аміаку в субстраті гальмує розвиток бактерій. Для оптимальної життєдіяльності бактерії також необхідна невелика кількість мікроелементів [125].

Після цього кислотоутворювальні бактерії, що чутливі до температури середовища, з органічних кислот утворюють вихідні продукти для формування метану, а саме: оцтову кислоту, діоксид вуглецю та вуглець. Саме на цій стадії синтезується 90 % утвореного метану. Майже 70 % його утворюється з оцтової кислоти. Тому вважається, що її рівень є показником швидкості утворення метану за оптимального рівня рН 7,0. При цьому температура може бути у межах 6,6–8,0 °С [369]. В кінці бродіння вміст метану становить 55–70 %, вуглекислого газу – 30–45 і менш як 1 % інших газів (сірководень, аміак, ароматичні вуглеводні тощо) [237]. Найбільше впливає на швидкість анаеробного бродіння та його обмеження стадія гідролізу оцтової кислоти у метан під час розкладання полімерумісних відходів. На останньому етапі утворюється метан, діоксид вуглецю і вода. Вони є продуктами життєдіяльності анаеробних метанових бактерій з оцтової і мурашиної кислоти, вуглецю й водню.

Метаболіти усіх груп бактерій забезпечують поживними речовинами кожен наступну групу. Зокрема, перша група бактерій за допомогою ферментів перетворює білки, вуглеводи і жири на низькомолекулярні сполуки (воду, жирні кислоти, амінокислоти). Кислотоутворювальні бактерії перетворюють ці сполуки у нестійкі жирні кислоти (оцтова, мурашина, пропіонова), етанол, вуглець і гази (вуглекислий, водень, сірководень, аміак). Бактерії, що спеціалізуються на виробництві водню, перетворюють жирні кислоти в оцтову і мурашину кислоти, вуглекислий газ і водень. Потім метаноутворювальні бактерії оцтову і мурашину кислоти переробляють у метан [384]. Важливим чинником ефективності бродіння є температурний режим. Природне виділення біогазу відбувається за температури від 0 °С до 98 °С з урахуванням оптимального процесу переробки сировини з дотриманням таких температурних режимів: психрофільного (20–25 °С);

мезофільного (25–40) і термофільного (понад 40 °C) [320]. Метанові бактерії виконують свою життєдіяльність за температури 0–70 °C. За вищої температури вони починають гинути, за винятком кількох штамів, які можуть жити за температури середовища до 90 °C. За мінусової температури вони призупиняють свою життєдіяльність [120, 137]. Зміна температури упродовж доби не повинні перевищувати двох градусів для психофільного режиму збродження, одного – для мезофільного і 0,5 градуса – для термофільного режимів [104].

Не дивлячись на те, що процес розкладання целюлози у термофільних умовах проходить у 14 разів інтенсивніше, ніж у мезофільних, а кількість біогазу, що отримується, на 25–30 % вища, термофільні процеси мають нижчу стабільність, ніж мезофільні, а допустимі зміни температури нижчі [160, 137]. Для анаеробного збродження зазвичай використовують мезофільний режим з температурою 34–42 C [95, 97, 98, 160, 173].

Для кожного режиму в реакторі необхідно підтримувати оптимальний рівень температури і регулярно перемішувати біомасу. За термофільного режиму пришвидшується розкладанням сировини, знищуються хвороботворні бактерій, що сприяє виходу більшої кількості біогазу. До недоліків цього методу можна віднести високі енерговитрати, значну чутливість до перепадів температури, низьку якість дигестату. Тривалість бродіння сировини за психрофільного температурного режиму складає від 30–40 і більше діб, за мезофільного – в межах 10–20, за термофільного режиму – в межах 5–10 діб [101, 120, 149, 247]. Зазвичай використовується мезофільний режим температур.

Іншим важливим чинником метанового бродіння є відношення в сировині між азотом і вуглецем. Нестача азоту обмежує процес утворення метану. При цьому утворюється велика кількість аміаку, який токсично діє на бактерії. Відношення вуглецю та азоту від 10 до 20 сприяє найвищому газоутворенню [298]. За метанового бродіння зберігається до 83 % енергії збродженої глюкози, що є найбільш енергоефективним способом перетворення енергії органічних речовин.

У експерименті [248] порівнювались два температурні режими: мезофільний (35°C) та термофільний (55 °C), із застосуванням трьох типів органічних відходів: пташиного посліду, гною ВРХ та свинячого гною. Вивчалось також оптимальне відношення C/N для поліпшення енергоефективності процесу. Пташиний послід виявився найбільш ефективним субстратом для біоконверсії, що відкриває перспективи для його використання в промислових масштабах.

Використовуючи побічний продукт когенераційної установки і котельні – золу в суміші з дигестатом біогазової установки, можна отримати удобрювальний продукт для підвищення родючості ґрунту. Суміші деревної золи і дигестату дають змогу отримати високі врожаї пшениці озимої без внесення мінеральних добрив [196].

Агрохімічний склад і характеристики дигестату, отриманого на виході з біогазових установок, істотно залежать від виду і походження вихідної сировини, яка завантажується в метантенк [135, 268]. До основних хімічних показників, що характеризують якість органічних удобрювальних продуктів відносять: показник рН суспензії, вміст органічних речовин, фосфору, калію, азоту, в тому числі амонійних сполук, інших макро- й мікроелементів: Ca, Mg, S, Fe, B, Cu, Co, Mn, Mo і Zn, що мають істотне значення для росту й розвитку рослин. Дигестат також містить органічний вуглець, у т. ч. у складі гумінових речовин (1–3 % від маси). Порівняно з незабродженою сировиною, частка потенційно доступного для рослин азоту сягає 10–70 %, оптимальне відношення C : N, значення показника рН 6,8–7,5, активні популяції бактерій, що оптимізують мікробіологічну активність ґрунту [27]. Агрохімічний склад і характеристики дигестату значно залежать від властивостей субстрату та способу годівлі тварин [268]. Використання супутніх продуктів для виробництва добрив несе ризик поширення забруднювачів та інших небезпечних речовин [215, 252]. Тому важливо оцінити їхню удобрювальну ефективність і потенціал для заміни синтетичних або мінеральних добрив. Через новизну цих добрив необхідно також виявити потенційні забруднювачі,

такі як важкі метали [224]. Науково обґрунтовані знання щодо впливу дигестату на ріст і фізіологію сільськогосподарських культур є цінними і необхідними, але досі лише небагато досліджень зосереджені на середньо- чи тривалих проміжках часу чи сівозміні.

Згідно з деякими дослідженнями, анаеробні ферментовані продукти більш потенційно шкідливі довкіллю та здоров'ю людини, ніж тваринний гній [334]. Проте останні дослідження показують, що аеробний дигестат має кращі удобрювальні властивості, ніж гній, і його більш широке застосування може зменшити потребу в мінеральних добривах [256].

За даними [250], застосування біогазового дигестату дало такі ж результати, як і мінеральні добрива (польові експерименти проводилися впродовж шести років на південному заході Німеччини). Мінеральні добрива можна повністю замінити дигестатом, але найкращі результати досягаються за додаткового підживлення мінеральними добривами разом із дигестатом. Це дозволяє зменшити дози мінеральних добрив до 66 %.

На один мегават потужності біогазової установки за рік утворюється 40–50 тис. т дигестату. Кількість його також залежить від вихідної сировини, кг/т: гною свиней – 990, гною ВРХ – 920, бурякового жому – 910, курячого посліду – 890, силосу кукурудзи – 780 [288]. Маса дигестату можна зменшити, якщо частину його повернути до ферментаційного відсіку біогазової установки [142]. Зброджений субстрат також може бути розділений на рідку й тверду фракції. Досягти оптимальної маси і консистенції дигестату можна застосуванням певної технології [145, 328]. В залежності від сировини можуть бути використані окремо або у комплексі окремі складові технології (сепарації, центрифугування, подрібнення, змішування, сушіння, гранулювання, концентрування або вилучення з його складу окремих елементів) [53]. Продуктом переробки можуть бути гранули органічної речовини, що містять увесь набір необхідних для живлення рослин макро- та мікроелементів, а також можуть містити речовини метаболізму рослин, тварин і мікроорганізмів.

За територіально обмеженого накопичення органічних відходів тваринництва поблизу підприємства виділяють екологічні чинники негативного впливу та основні загрози: здатність змінювати навколишню екологічну ситуацію, що погіршує умови проживання людей; висока концентрація забруднюючих речовин у ґрунті й повітрі, що прямо чи опосередковано змінює їх склад, флору і фауну; висока ймовірність забруднення природних водойм і поверхневих ґрунтових вод [135]. Було показано, що хімічний склад анаеробного дигестату та свинячого гною впливає на мікробіологічні процеси у ґрунті, а також на викиди азоту після внесення [198, 317].

Потреба у зберіганні дигестату виникає в результаті безперервного його виробництва та сезонного використання в рослинництві. Дигестат зберігають у сховищах різного об'єму та форм, надземних і підземних, побудований з різних матеріалів. Часто застосовують систему лагун, де проходить природне відстоювання дигестату з переведенням освітленої фракції у наступну ємкість [158].

Нині в довкіллі України проходять різні негативні процеси, пов'язаних з накопиченням відходів різного походження. Обмеження негативного їх впливу є глобальною екологічною проблемою, що впливає на всі сфери життя і діяльність людини. Задекларовані у Постанові Кабінету Міністрів України напрями державної політики у рамках ініціативи Європейської Комісії «Європейська зелена угода» стосуються виробництва продукції тваринництва, яке характеризується доволі значними обсягами відходів на одиницю площі сільськогосподарських угідь, намаганням із найменшими витратами отримати найбільшу кількість продукції, часто з ігноруванням екологічної безпеки.

Весь технологічний процес виробництва продукції тваринництва супроводжується застосуванням та утворенням органічної речовини. Під час її розкладання відбувається утворення та емісія та в атмосферу аміаку та інших парникових газів. Послід птиці є одним з основних джерел викидів аміаку в сільському господарстві.

На початку дослідження дигестатів вивчали можливість зменшення запахів, розкладання біомаси і збереження патогенних мікроорганізмів [334]. Потім було проведено вивчення можливості їх застосування як удобрювальних продуктів [216]. Встановлено, що застосування дигестату, порівняно з мінеральними азотними добривами зменшує викиди парникових газів (на 35-ту добу після внесення) [242]. Було зроблено висновок, що супутні продукти виробництва біогазу можуть замінити мінеральні добрива в циклі біомаса–біогаз–біомаса [332]. При цьому зменшується забруднення атмосфери [193], а також підтримується стабільність функціонування ґрунту [323].

За метаногенезу лише 15 % вуглецю субстрату включається у знову утворену мікробну біомасу, а за азотних ферментативних процесів цей показник перевищує 50 % [158]. Проте за неправильного використання, ферментація та седиментація сировини у біогазових установках може призвести до забруднення довкілля [289]. Метаногенезом можна уникнути забрудненню довкілля патогенними мікроорганізмами. Загибель патогенних бактерій, яєць гельмінтів в метантенках за температури 50–60°C проходить вже на 2–3 добу. При цьому поліпшуються удобрювальні властивості дигестату. Всі елементи мінерального живлення після збродження зберігаються і переходять в доступніші для рослин форми. Кількість доступного азоту складає 100 %, фосфору – 70 і калію – 80 % [158]. Однією з переваг дигестату є високий вміст поживних речовин порівняно з сировиною, в першу чергу азоту у формі  $\text{NH}_4^+$  [324]. Однак під час анаеробного зброджування значна кількість азоту виділяється у формі аміаку, а зберігається фосфор [367] і калій [208].

Метаногенез рідкого гною задовольняє всі сучасні вимоги охорони довкілля. За термофільного режиму зброджування (55 °C) гинуть патогенні мікроорганізми, яйця гельмінтів, насіння бур'янів. Солі важких металів стають нерозчинними і недоступними для асиміляції рослинами [158].

Нині інтенсивне землеробство є однією з головних проблем і викликів глобального сільського господарства. Важливою проблемою є подолання негативних впливів на довкілля, таких як втрата органічної речовини ґрунту [201]. Органічна речовина ґрунту має важливе значення для багатьох біохімічних процесів, пом'якшення наслідків зміни клімату. Це спонукає до пошуку альтернативних джерел органічних добривальних продуктів, які можуть сприяти відновленню гумусу в ґрунті й поліпшувати його родючість [206]. Зберігати гумусовий стан ґрунту можна додаванням зовнішнього джерела органічної речовини [164, 404].

З огляду на недостатню кількість органічних добрив для традиційного землеробства, джерелами органічної речовини у ґрунті можуть слугувати нетрадиційні види органічних добривальних продуктів, зокрема дигестат.

У науковій літературі накопичений значний матеріал з питань трансформації у ґрунті основних органічних добрив, встановлений механізм розпаду та синтезу речовин, виявлено значення абіотичних і біотичних чинників у цих процесах. Ґрунт є універсальним бар'єром у якому проходить розкладання всіх органічних речовин, що до нього надходять. Він має здатність самоочищуватися завдяки складним фізико-хімічним і біохімічним процесам мінералізації і синтезу нових органічних речовин – гумусу. На основі цього ґрунтові методи утилізації і знезараження різних органічних відходів давно застосовуються без шкоди як для самого ґрунту, так і для довкілля і здоров'я людини. Але самоочищувальна здатність ґрунту не безмежна. Масове забруднення ґрунтового покриву відходами людської діяльності, добривальними продуктами приводить до небажаних наслідків для довкілля [50]. До них необхідно віднести і відходи птахівництва.

За удобрення ґрунту відходами тваринництва як чинники ризику виділяють: патогенні мікроорганізми, нітрати, калій, важкі метали та інші сполуки що входять до складу гною, а також антибіотики, що застосовуються для лікування тварин [27]. Виділено кілька десятків захворювань людини, пов'язаних з внесенням у ґрунт відходів тваринництва. Швидкість



мінералізації і гуміфікації органічних решток залежить від багатьох чинників, основні з них: фізико-хімічні властивості ґрунту і гідротермічний режим. Вони визначаються географічним положенням території й кількістю забруднювачів, що вносяться на одиницю площі.

У 2022 році в Берліні відбувся Глобальний форум з продовольства та сільського господарства [264]. Його було присвячено питанням здоров'я ґрунтів та їх впливу на продовольчу безпеку і глобальні кліматичні проблеми. Учасники форуму погоджуються, що:

- необхідно досягти прогресу в пом'якшенні наслідків зміни клімату та адаптації до його змін;
- біорізноманіття ґрунтів є життєво важливим для їх здоров'я.

Необхідність впровадження Нітратної директиви [54] щодо захисту вод від забруднення сполуками азоту та фосфору із сільськогосподарських джерел продиктована апроксимацією законодавства України до права ЄС у сфері охорони довкілля [124].

Нераціональне застосування добрив спричинює забруднення вод фосфором, що викликає процес евтрофікації [157]. Це має негативні наслідки: гине риба, втрата рекреаційних зон, негативний вплив на здоров'я людини [87].

Органічним добривом вважається готовий для внесення у ґрунт продукт, який відповідає визначеним вимогам: має оптимальну реакцію середовища, не містить збудників хвороб, життєздатного насіння бур'янів, токсичних речовин і важких металів вище ГДК, тощо. Дози і строки внесення органічних добрив необхідно встановлювати з урахуванням вмісту в них загального азоту залежно від ґрунтових умов, ротації культур у сівозміні, застосування мінеральних добрив [124].

Анаеробні дигестат та свинячу суспензію рекомендується застосовувати для основного удобрення озимих культур. Ці продукти забезпечуються рослини азотом під час відновлення весняної вегетації і в кінці вегетації. Рідкі органічні добрива не поступаються синтетичним азотним добривам,

підвищують урожайність та поліпшують якість зерна. Постійне використання цих добрив підвищує родючість ґрунту та знижує залежність від синтетичних добрив [344].

Екологічна безпека технологій переробки органічних продуктів тваринного і рослинного походження розглядається насамперед на відповідність наступним критеріям: 1) компенсація органічної речовини і поживних речовин ґрунту, винесених з врожаєм; 2) вирішення проблем соціальної напруги навколо тваринницьких господарств; 3) відсутністю технологічних етапів, пов'язаних із використанням полютантів і прекурсорів; 4) відсутністю проміжних побічних продуктів у процесі переробки; 5) запобіганню біологічного забруднення органічної речовини; 6) наданням продуктам переробки технологічних властивостей для тривалого зберігання і подальшого транспортування; 7) мінімізації емісії аміаку з добрива у процесі зберігання; 8) механізоване внесення добрива у ґрунт продуктивним устаткуванням [136].

Бродінням з екологічної погляду має важливе значення для екопідприємств, оскільки дає можливість переробити органічні сполуки азоту на відповідні удобрювальні продукти. Будівництво біогазової установки створює нові робочі місця, можливість виведення своїх стічних вод з ферми у біогазову установку замість підключення дорогою каналізації.

## **1.2 Вплив супутніх продуктів виробництва біогазу на властивості ґрунту**

Нині, у зв'язку з підвищенням продуктивності сільськогосподарських культур, зниженням рівня застосування органічних і мінеральних добрив суттєвих змін зазнав поживний стан ґрунтів. Використання органічних добрив обумовлюється їх невисокою вартістю, порівняно із мінеральними добривами, і високою ефективністю завдяки оптимальному вмісту макро- й мікроелементів. Наявність у їх складі корисних мікроорганізмів і елементів

живлення сприяє відновленню вмісту гумусу та поліпшує властивості й поживний режим ґрунту [46].

Тривале застосування мінеральних добрив викликає інтенсивну мінералізацію органічної речовини і зменшує вміст гумусу, який визначає основні агрономічно цінні властивості ґрунту. Це призводить до погіршення структурної стабільності ґрунту, зменшення пористості та збільшення кількості мікроагрегатів. З руйнуванням водостійкої структури орний шар ґрунту втрачає свої початкові фізико-хімічні властивості, що негативно впливає на розвиток коренів рослин, а й змінює водно-газо-теплове середовище та баланс системи добрив–ґрунт–живлення рослин [420]. Одним із резервів відновлення вмісту гумусу є застосування біоорганічних добрив із позитивним агрохімічним та мікробіологічним складом, які отримуються ферментацією відходів тваринництва у біогазових установках [143].

У середньому вміст азотних речовин у дигестаті на відміну від сирого гною та посліду зберігається на 70 %, вміст калію та фосфору – на 100 %. Тому необхідно компенсувати тільки 30 % азоту мінеральними добривами [111, 167]. Застосування дигестату забезпечує підвищення врожайності на 10–50 %, поліпшує якість отриманої продукції і підвищує родючість ґрунту [98].

Дигестат є високоефективним незараженим добривом. За його внесення в ґрунт повертаються поживні речовини й лігнін, що є основою утворення гумусу й забезпечує виробництво екологічно чистої продукції [149, 150].

Як уже зазначалось, дигестат багатий на поживні речовини, необхідні рослинам, а також містить багато гумінових кислот, органічних речовин, тощо. Це як швидко-, так і повільнодійне органічне добриво, що може поліпшувати родючість ґрунту, а також підвищувати вміст у ньому азоту, фосфору, калію та мікроелементів [260], поліпшувати його фізичні властивості [401].

З основних показників якості ґрунту найважливішим є вміст і якість органічної речовини. Практика ведення сільського господарства, зміни у землекористуванні, аерація ґрунту та системи землеробства можуть впливати

на його фізичні, хімічні та біологічні властивості, продуктивність культур і стабільність екосистеми. Органічний вуглець є основною складовою органічної речовини ґрунту та має важливе значення в підвищенні родючості ґрунту та регулюванні метаболічних циклів поживних речовин [155]. Органічні речовини ґрунту містять увесь азот ґрунту, більшу частину фосфору та багато інших макро- та мікроелементів. Ґрунтова мікробіота відіграє велике значення у формуванні органічної складової ґрунту [86, 287]. За інтенсивного посилюються процеси розкладання органічної речовини ґрунту, що зумовлює втрати 40 % вуглецю [399]. За мінеральних систем удобрення відношення C : N не збалансоване через недостатнє надходження вуглецю в ґрунт [423]. За органічної і органо-мінеральної систем удобрення може значно збільшитися вміст органічної речовини у ґрунті, поліпшиться його середовище та збільшитися кількість і різноманітність ґрунтових мікроорганізмів [46, 408]. Розкладання органічних речовин у ґрунті – це складний і тривалий процес, що включає механічні, біологічні та хімічні процеси.

Азот є одним із життєво важливих елементів живлення, необхідних для росту рослин, оскільки підвищує врожайність зерна та поліпшує якість ґрунту. Тому застосування азотних добрив різко зросло. Однак встановлено, що надмірне застосування добрив призводить до високих втрат азоту та забруднення довкілля і лише 30–40 % азоту добрив поглинається рослинами і зберігається в зерні [321]. Нині лише 47 % азоту синтетичних мінеральних добрив перетворюється на продукти, порівняно з 68 % у 1960 році, що свідчить про зниження їх ефективності [302]. Більша половина внесених азотних добрив не досягають мети [29]. Це збільшує витри ресурсів, загрожуює забрудненню повітря, води, ґрунту, біорізноманіттю та створює викиди парникових газів [115, 300]. З урахуванням цього ЄС оголосив про обмеження використання мінеральних добрив і зосередився більше на агротехнологічних заходах, які б зменшили застосування добрив і підвищили ефективність азоту добрив.

Використання азотних добрив, особливо рідких, може призвести до втрати азоту під час і після внесення, що матиме негативний вплив на довкілля [380]. Залежно від умов навколишнього середовища та ґрунту амонійний ( $\text{NH}_4^+$ ) азот перетворюється на нітратний ( $\text{NO}_3^-$ ). Процеси мікробної нітрифікації і денітрифікації можуть призвести до втрат викидів закису азоту ( $\text{N}_2\text{O}$ ), який має вищий потенціал парникових газів, ніж діоксид вуглецю ( $\text{CO}_2$ ). Крім того,  $\text{NO}_3^-$  легко мігрує в ґрунті порівняно з  $\text{NH}_4^+$  і може промиватися по його профілю [29]. З цієї причини необхідно оптимізувати внесення азотних добрив, щоб поліпшити засвоєння азоту культурами. З іншого боку, зменшення внесення азотних добрив призведе до зниження продуктивності культур. Тому існує нагальна потреба в нових способах ведення сільського господарства для досягнення оптимальних результатів і забезпечення екологічних та економічних переваг.

Варіантом і рішенням зменшення застосування синтетичних азотних добрив може бути використання різних органічних добрив, таких як гній, компост, дигестат тощо. Більшість із них добре вивчені, але зменшення поголів'я худоби в Україні призвело до зменшення кількості виробленого гною. Водночас решта органічних джерел потребують вирішення проблеми ефективного застосування та втрат після внесення. Отже, впровадження нових інноваційних альтернатив у систему управління мінерального живлення сільськогосподарських культур є перспективною альтернативою синтетичним добривам у сільському господарстві.

Зміни вмісту азоту та вуглецю в ґрунті визначаються сукупністю чинників. В агроєкосистемах основні причини зменшення органічного вуглецю такі: 1) оскільки більшість вирощеної біомаси вивозиться з поля, то у ґрунті залишається мало рослинних решток; 2) свіжовирощена біомаса менш стійка до мінералізації; 3) змінюються фізичні властивості ґрунту, спричинені обробітком (інтенсивний обробіток ґрунту збільшує аерацію ґрунту, пришвидшує мінералізацію, в результаті чого утворюється більше фракцій лабільного вуглецю, схильних до деградації, оскільки вони не зв'язані з

глинистими мінералами); 4) ґрунт без рослинного покриву втрачає вуглець через посилене вимивання та ерозію; 5) використовується нераціональна сівозміна; 6) незбалансоване внесення добрив із повною відмовою або недостатнім внесенням органічних добрив [376, 426]. Встановлено, що відношення  $C : N$  контролює перетворення органічної речовини. Якщо цей коефіцієнт більше 30, відбувається іммобілізація азоту, а якщо менше 20 – відбувається інтенсивна мінералізація, під час якої збільшується вміст у ґрунті азоту мінеральних сполук. Цим коефіцієнтом можна управляти за допомогою різного обробітку ґрунту, різноманітності культур сівозміни, точного внесення добрив [232].

Мінеральний азот із дигестату зазвичай погано іммобілізується в ґрунті не лише через низьке відношення  $C : N$ , але й через дуже стабільну кількість органічної речовини. Якщо порівнювати різні дигестати (наприклад, ті, що виробляються з осаду стічних вод), то деякі з них мають високі показники мінералізації і нітрифікації органічної речовини, тому постачання рослин азоту мінеральних сполук подібне до карбаміду. Завдяки своїм властивостям він може принаймні частково замінити або доповнити синтетичні азотні добрива та зменшити дозу їх внесення [403].

Одноразове або періодичне внесення органічних продуктів може збільшити вміст органічної речовини у ґрунті та поліпшити ґрунтове середовище. Інтенсивне сільськогосподарське використання ґрунту виснажує запаси органічної речовини, що негативно впливає на його родючість і біорізноманіття екосистем. Відношення вмісту органічного вуглецю до азоту ( $C : N$ ) у ґрунті є важливим показником його здоров'я та доступності поживних речовин для рослин. Активність мікроорганізмів і мінералізація органічної речовини сприяють збалансованому відношенню  $C : N$ , але інтенсивний обробіток ґрунту та неправильна сівозміна можуть вивести його з рівноваги. Правильним застосуванням органічних удобрювальних продуктів і різноманітністю вирощуваних культур можна підтримувати оптимальне відношення  $C : N$  у ґрунті. Це відношення є критичним показником, який

впливає на родючість ґрунту, доступність поживних речовин і активність мікробів [344].

Компости, підстилка та солома містять найбільше зв'язаного азоту в органічних сполуках. Гній збільшує вміст органічного вуглецю у ґрунті завдяки вищій його стабільності [218]. Збільшення кількості органічних речовин у ґрунті допомагає рослинам адаптуватися до мінливих умов кліматичних умов (зміна режимів температури, вологості) або пом'якшити їх негативний вплив [3].

Результати тривалих стаціонарних дослідів [172] показують, що застосування мінеральних добрив може збільшити частку великих пор у ґрунті та об'ємну щільність ґрунту. При цьому польова вологоємність зменшується. Внесення мінеральних добрив у поєднанні з органічними може значно поліпшити фізико-хімічні властивості ґрунту. Правильно сформовані дигестати можна вважати органічними поліпшувачами ґрунту або органічними удобрювальними продуктами. Органічна речовина дигестату також може не тільки позитивно впливати на живлення рослин і якість ґрунту, але й завдяки органічній речовині стабілізує структуру ґрунту та зменшує поверхневий стік [164], збільшує інфільтрацію води, посилює агрегацію ґрунту і таким чином зменшує ризик ерозії. Застосування дигестату може поліпшити якість ґрунту завдяки збільшенню вмісту органічної речовини, рухомих сполук елементів живлення та активності мікроорганізмів [208, 243] і підвищення продуктивності культур [242].

Застосування дигестату може ефективно запобігти підкисленню ґрунту, викликаному тривалим застосуванням мінеральних добрив. Інтенсивне використання високих доз мінеральних добрив, особливо азотних, призвело до значних проблем (висока вартість, забруднення нітратами, втрата ґрунтового вуглецю). У зв'язку зі збільшенням потреби виробництва екологічно чистої продукції рослинництва, на органічні добрива звертається все більше уваги. Вони сприяють підвищенню родючості ґрунту, оскільки містять природні

сполуки елементів живлення та поліпшують мікробіологічну активність ґрунту [351].

Запас органічних речовин у ґрунті можна відновити залишенням на полі біомаси, особливо післязбиральних решток. Однак це не завжди виправдано. Зменшення кількості опадів в останній період сповільнило біодеградацію біомаси у ґрунті. Крім того, післязбиральні рештки у ґрунті є живильним середовищем для росту грибів, які становлять загрозу для культур і гомеостазу ґрунту [371].

Мінеральні добрива мають сприятливий вплив лише в перші роки внесення, при чому на ґрунтах де вуглець органічних сполук переважає над азотом і біогенними елементами, в іншому випадку вони мають депресивний вплив [188].

Згідно з національним стандартом України ДСТУ 7846 [66] зміни показників родючості ґрунтів вважаються суттєвими, якщо є розбіжність між вихідними і поточними значеннями показників родючості хоча за одним зі ступенів деградації ґрунту, визначених у ДСТУ 7872 [68]. Для вмісту гумусу це граничне зменшення складає 5 %.

Дигестат широко досліджується як органічне добриво, призначене для підвищення родючості ґрунту. Поряд з поліпшенням поживного режиму, він сприяє утриманню вологи і підтриманню мікробіологічної активності ґрунту. Використання дигестату як органічного добрива може стати ефективним способом заміни мінеральних добрив, зниження негативного впливу на довкілля та забезпечення сталого розвитку сільського господарства [9].

В результаті анаеробних процесів ферментації, дигестат може мати вищий вміст азоту та інших елементів живлення порівняно з неферментованим гноєм [308], що, у свою чергу, може впливати на ефективність добрив. Деякі тимчасові дослідження виявили нижчу ефективність використання азоту органічних добрив (гноївка, дигестат) порівняно з мінеральними добривами [361], що, ймовірно, пов'язано з ризиком втрат азоту через вимивання та звітрювання аміаку [358]. Однак, тривалі дослідження показали позитивний вплив



органічних добрив на формування врожаю сільськогосподарських культур, що залежить не лише від кількості внесеного азоту, але й від інших аспектів використання органічних добрив, пов'язаних зі змінами родючості ґрунту [361]. Різні результати досліджень впливу дигестату на врожайність пшениці пояснюються взаємодією багатьох чинників, що включають дозу та тип субстрату [195]. Вплив дигестату на врожайність сільськогосподарських культур залежить від багатьох чинників, таких як властивості ґрунту, погодні умови упродовж вегетаційного періоду, хімічний склад дигестату та способи внесення [343].

Отже, дигестат якісно й кількісно відрізняється від традиційних органічних і мінеральних удобрювальних продуктів: він близький або подібний природним сполукам; цілеспрямовано вноситься в ґрунт для включення в біологічний цикл ґрунт–рослина–продукція; має високу біологічну активність; тривало і у великій кількості застосовується на одних і тих самих полях. Тому і підходи до оцінювання побічних ефектів його застосування повинні бути іншими, як і система заходів із запобігання забруднення довкілля. Досліджень, проведених у цьому напрямку ще недостатньо.

Важливою перевагою використання дигестату, як органічного добрива, є можливість поліпшення структури ґрунту та здатності утримувати вологу. Це позитивно впливає на ріст і розвиток рослин. Додаткові витрати, пов'язані з використанням дигестату, окупаються завдяки підвищенню продуктивності культур. Однак ефективність використання дигестату може змінюватися залежно від низки чинників: культури, умови її вирощування та складу ґрунту. Тому перед впровадженням його застосування рекомендується детально обґрунтувати і визначити оптимальні дози внесення.

Поживні речовини з мінеральних добрив відразу стають доступними для рослин, то з органічних – повільно вивільнюються впродовж багатьох років [338]. За недостатнього зволоження значно зменшується їх доступність рослинам, що критично знижує кількість надземної біомаси, що повертається

у ґрунт. Ґрунти з низьким вмістом гумусу більш вразливі до зміни клімату [322].

Гумусу ґрунту належить важливе місце у вирішенні проблем підвищення родючості ґрунтів і продуктивності культу. Неможливо переоцінити його значення у формування профілю й поживного режиму ґрунту, створенні структури, аерації тощо. Гумус ґрунту оцінюється і з позиції основного чинника формування запасів енергії у ґрунтах [124].

У ґрунті одночасно відбуваються два взаємопротилежні процеси трансформації органічної речовини – мінералізація й гуміфікація. Внесена у ґрунт свіжа органічна речовина у ґрунті мінералізується впродовж двох років на 70–80 %, решта піддається гуміфікації. Інтенсивність мінералізації залежить від запасів гумусу в ґрунті, його типу та удобрення. У суглинкових ґрунтах вона складає 1,5–1,6 % за рік від запасів в орному шарі, супіщаних – 1,7–1,8, піщаних – 1,9–2,0, чорноземах і темно-сірих лісових – 0,5–0,7, сірих і світло-сірих лісових ґрунтах 0,8–1,0 % [124].

Мортмаса трансформується в гумус із періодом повної мінералізації складових його новоутворених складових від 10 до 100 років. Щоб бути секвестрованою, органічна речовина повинна стабілізуватися в ґрунті, бути захищеною від швидкого розкладання. Водночас вона повинна бути здатною до повільної мінералізації. Оцінюють секвестрацію вуглецю за змінами валового вмісту органічного вуглецю в ґрунті або його запасів у різних шарах за певний період [156].

Якщо ґрунтова секвестрація вуглецю передбачає поглинання  $\text{CO}_2$  з атмосфери утворенням нової біомаси, то депонування спрямоване на збереження органічного вуглецю в ґрунті та запобігання швидкому його поверненню в атмосферу під час мінералізації. Проте ґрунт має певну межу насичення органічним вуглецем, вище якої його накопичення неможливе [249]. Рівень умісту гумусу в ґрунті залежить від поєднання таких чинників, як розміри чистої продукції екосистеми, якість рослинних решток, гідротермічні умови, рельєф місцевості, мінералогічний і гранулометричний склад, хімічні та

біологічні властивості ґрунту, господарська діяльність і наявність руйнівних впливів, що ініціюють втрати вуглецю. Тому в орних і цілих ґрунтах проявляється просторова, сезонна та багаторічна мінливість вмісту гумусу [156].

Дефініція «родючість ґрунту» нині визначається як здатність забезпечувати рослини необхідними умовами росту й розвитку впродовж вегетації: елементи живлення та вода, хімічний, мінералогічний, гранулометричний склад, уміст гумусу, водно-фізичні, фізико-хімічні та біологічні властивості, рівень агротехнології тощо [61]. Ретроспективно зарубіжний досвід кількісно-якісного оцінювання родючості едотопів висвітлено в зарубіжних джерелах [347].

Вміст гумусу є важливим показником якості ґрунту, який визначає фізичний, хімічний і біологічний його стан і забезпечує стаке виробництво продукції рослинництва [164]. Встановлено, що кращий результат давало одноразове внесення високих доз органічного добрива, порівняно з малими дозами (10–15 т/га) [338].

Застосування дигестату сприяє збільшенню вмісту поживних речовин у ґрунті [290]. Рівень рН дигестату зазвичай становить 7,5–8,0, що може ефективно поліпшити ґрунти з кислою реакцією середовища. Поряд з цим елементи живлення та органічні речовини, що надходять у ґрунт із дигестатом, змінюють фізико-хімічні властивості та родючість ґрунту. Встановлено [424], що при цьому поліпшується пористість, об'ємна щільність ґрунту, підвищується вміст у ньому макроеlementів і органічних речовин.

Значення рН є важливою хімічним показником ґрунту, який може впливати на розчинність поживних речовин і, зрештою, – на надходження їх у рослини. Внесення тільки мінеральних добрив може знизити рН, а застосування дигестату – його підвищити. Дигестат сам по собі є лужним і містить багато катіонів. Збільшення вмісту основ може певною мірою ефективно гальмувати тенденцію підкислення ґрунту, спричинену тривалим

застосуванням мінеральних добрив, і кислотно-лужне середовище ґрунтового розчину може бути поліпшено [419].

Застосування дигестату підвищує рН ґрунту на 0,2–1,0 одиниці, вміст органічної речовини ґрунту збільшився на 0,1–3,1 г/кг, тобто зі швидкістю збільшення відповідно 5–24 % і 0,4–9,8 %. У ґрунті збільшився вміст азоту легкогідролізованих сполук, рухомих сполук фосфору й калію. При цьому показники родючості ґрунту поліпшувались з такою швидкістю: рухомі фосфати > рухомі сполуки калію > валовий фосфор > валовий азот > валовий калій > азот легкогідролізованих сполук [396].

Внесення дигестату під пшеницю озиму зменшувало об'ємну щільність ґрунту, збільшувало його пористість та значення рН, сприяло агрегуванню ґрунту, підвищувало його здатність утримувати воду та добрива, а також поліпшувало інші властивості ґрунту [388]. Заміна добрив дигестатом поліпшило структуру рекультивованого червонозему та сприяло збільшенню вмісту органічної речовини у ґрунті, рухомих сполук макро- та мікроелементів [421].

Складення та шпаруватість ґрунту відображає щільність ґрунту, яка має значний вплив на основні режими ґрунту та ефективність сільськогосподарського виробництва. При цьому формуються значні відмінності між різними шарами ґрунту за внесення дигестату й мінеральних добрив. Найбільше щільність ґрунту зменшилася у варіанті досліду з внесенням під пшеницю озиму 1/2 азоту з дигестатом та 1/2 – з мінеральними добривами і була в межах прийнятного діапазону для культури, що сприяло збільшенню її врожайності [419].

Формування високого фосфатного тла (завдяки залишковим фосфатам) у ґрунтах зменшує використання вологи на створення продукції на 15–55 % [128]. Цим пояснюється підвищення стійкості рослин до посухи на тлі дигестату [345].

Перевищення оптимальної дози внесення рідких органічних добрив збільшує вміст у ГВК калію і натрію та викликає вимивання в нижні шари

кальцію [6]. Це веде до осолонцювання ґрунту, що зменшує водопроникність і погіршує структурний стан ґрунту. За інтенсивного застосування РОД вміст фосфору й калію значно збільшується. Надлишок їх веде до блокування засвоєння рослинами магнію та порушення процесів фотосинтезу [326]. Велика кількість фосфору, накопиченого на поверхні ґрунту, і його втрата та вимивання азоту веде до евтрофікації водойм і забруднення підземних вод [290]. Вторинні екологічні проблеми (забруднення води, вторинне засолення, підкислення та ущільнення ґрунту) потребують ефективного застосування дигестату та розроблення відповідних технологій.

Зрошення дигестатом збільшує біомасу та підвищує активність ґрунтових мікроорганізмів, підвищує здатність ґрунту фіксувати фосфор в органічних сполуках. Мікроорганізми поглинають фосфор, потім він може бути використаний рослинами, що зменшує його вимиванням у ґрунтові води [335].

Рідкий гній має високу біологічну активність. У ньому проходить інтенсивна трансформація вуглецю та азоту. Цьому сприяє хімічний склад і відносно висока рухомість поживних речовин і метаболітів, відношення C : N. Надходження у ґрунт розчинних поживних речовин сприяє якісному розвитку ґрунтової мікрофлори, активізує респірацію ґрунту, стимулює розвиток груп мікроорганізмів, що розкладають целюлозу, особливо міксобактерій. Органічні речовини і елементи живлення рідкого гною добре використовуються ґрунтовою мікрофлорою – швидко трансформуються, частково мінералізуються і гуміфікуються. Інтенсивність мінералізації суттєво залежить від гранулометричного складу ґрунту, структури сівозміни, якості рідкого гною. Навіть за його внесення дозою більш як 300 т/га безпосередньо перед сівбою не спостерігається негативного впливу на схожість і ріст рослин на початкових фазах вегетації [188].

### **1.3 Вплив супутніх продуктів виробництва біогазу на продуктивність сільськогосподарських культур**

Оскільки нині обсяги виробництва енергоносіїв, що доступні для сільського господарства зменшуються, вартість традиційних джерел енергії зростає. Тому зменшення енергетичних витрат на виробництво продукції стає актуальним. Технологія вирощування сільськогосподарських культур все більше залежить від природних умов довкілля та витрат енергії [30].

Відомо, що більше ніж 90 % світового виробництва їжі залежить від ґрунту. Ґрунт забезпечує середовище існування різних організмів і є найважливішим накопичувачем вуглецю. Проте якість ґрунтів у світі погіршується, а площі родючих земель зменшуються. Розвиток цих процесів необхідно зупинити раціональним використанням сільськогосподарських угідь. Існує нагальна потреба розроблення та впровадження ефективних практичних рішень з відновлення і прогресуючого підвищення родючості ґрунтів.

Питання технологічних аспектів застосування супутніх продуктів біогазового виробництва в ґрунтово-кліматичних умовах України відображені в багатьох публікаціях, однак питання його застосування як добрива саме під пшеницю озиму й кукурудзу в умовах сірих лісових ґрунтів вивчені недостатньо, що зумовило актуальність наукових досліджень за цією тематикою.

Зацікавленість фермерів у застосуванні дигестату пояснюється відсутністю достатньої кількості органічних добрив, що викликає дисбаланс органічної речовини у ґрунті та високою вартістю мінеральних добрив [313].

Завдяки своїм властивостям дигестат впливає на відновлення родючості ґрунтів у якості біоорганічного добрива, отриманого внаслідок зброджування органічної маси в біогазовій установці, цінність яких полягає в наступному [109]: завдяки корисній мікрофлорі дигестат позитивно впливає на ґрунтову біоту; сприяє збагаченню ґрунту органічними речовинами, гуміновими кислотами, необхідними для утворення гумусу; не містить збудників інфекції і насіння

бур'янів та інвазії, які є в неперебродженому тваринному гною, внаслідок застосування необхідних температурних режимів у біогазовій установці; рівень важких металів знижений порівняно з кількістю, яка є у неперебродженому гною; мають низьку частку (15 %) вимивання з ґрунту поживних речовин, тоді як гній може втрачати до 80 % [264], має післядію впродовж 5–6 років [109].

Дигестат багатий органічними і мінеральними поживними речовинами, які істотно впливають на формування врожаю [219]. Він є високоякісним рідким органо-мінеральним добривом. Незважаючи на те, що дигестат має нижчий вміст поживних речовин, ніж у традиційних мінеральних добривах, після анаеробної ферментації основні елементи живлення та інші поживні речовини перебувають у доступному стані та легко засвоюється рослинами, що є сприятливим для їх росту [241].

Дигестат містить амінокислоти, гумусові речовини, прості органічні сполуки і біологічно активні речовини, які необхідні для росту й розвитку рослин. Вони можуть сприяти кращому росту та поглинанню поживних речовин і відіграють основне значення в поліпшенні якості врожаю [223, 294]. За внесення дигестату змінюються такі важливі показники його якості – вміст вітаміну С, редукуючих цукрів, амінокислот і нітратів [282].

Біогазове виробництво сприяє багаторазовій переробці сільськогосподарських відходів, а дигестат має широкі перспективи застосування під високопродуктивні та рентабельні культури і в екологічно чистому сільськогосподарському виробництві.

Розроблення оптимальної системи застосування добрив з використанням дигестату, сприяння сталому розвитку рослинництва є одним зі шляхів збереження здоров'я ґрунту, удосконалення технології вирощування та підвищення врожайності та поліпшення якості пшениці озимої. Дигестат містить різні поживні речовини, які можуть поліпшити фізичні та хімічні властивості ґрунту, підвищити активність ґрунтових ферментів, поліпшити ріст і розвиток рослини й сприяти отриманню приросту врожаю. Однак,

постійне застосування великих доз дигестату матиме негативний вплив як на культури, так і на довкілля [419].

Дворічне внесення гною та біодобрих (50 % NPK) під пшеницю озиму та кукурудзу на Північно-Китайській рівнині в поєднанні з 50 % NPK мінеральних добрив може знизити собівартість виробництва без шкоди для врожаю та збільшити вміст органічного вуглецю в ґрунті [228].

У дослідженнях з рисом було встановлено, що доза 75 т/га є межею застосування дигестату. За нижчої дози його внесення збільшення частки елементів живлення мінеральних добрив поліпшує кушіння та висоту рослин рису. Введенням до складу системи удобрення дигестату, порівняно з традиційним удобренням, можна збільшити загальну кількість волотей у рослин рису [363]. Проте в іншому досліді [269] дигестат, як органічне добриво, мав нижчу ефективність. Застосування його під час росту та розвитку рису в поєднанні з мінеральними добривами сприяло підвищенню висоти і коефіцієнту кушіння рослин порівняно з традиційним удобренням.

В літературі зустрічаються суперечливі результати ефективності застосування дигестату як добрива під різні сільськогосподарські культури.

У проведених дослідженнях з овочевими культурами було встановлено, що застосування дигестату продовжує їх період вегетації і період збору врожаю. Вчені пояснюють це тим, що дигестат з гною худоби і посліду птиці містить значну кількість поживних речовин повільної дії, які подовжують ефективну дію добрива [325].

У досліді з помідором зі збільшенням дози внесення дигестату врожай плодів підвищувався. Це пояснюється підвищенням фізіологічної активності та інтенсивності ростових процесів у рослин, ліпшим гілкуванням, збільшенням кількості квіток на основному стеблі та масою плодів [414]. Але ефективність дигестату зростає лише до певної межі його участі у формуванні поживного режиму ґрунту. Збільшення його частки в дозі добрив не сприяє подальшому збільшенню врожаю помідорів [283].



Дигестат у поєднанні з мінеральними добривами поліпшує агрохімічні властивості орного шару ґрунту, підвищує стійкість ріпаку до стресу, сприяє кращому росту культури і збільшенню врожайності [370]. Дослідження [416] показали, що врожайність огірка за поєданого застосування дигестату й мінеральних добрив зростала на 14–45 % порівняно з підживленням лише дигестатом або мінеральними добривами.

Дослідження проведені на рисі, показало, що застосування дигестату сприяє збільшенню вмісту білка та елементів живлення в зерні [375], впливає на вміст нітратів і розчинного цукру в гірчиці [319], може значно збільшити вміст розчинного цукру та сухих речовин у суниці [241], у капусти збільшується вміст загального цукру, відновлювальних цукрів, вільних амінокислот і вітаміну С, але при цьому вміст нітратів зменшується [408].

Отже, застосування дигестату поряд з підвищенням урожаю сільськогосподарських культур, поліпшує якість продукції рослинництва, а також має економічні та екологічні переваги. Він може замінити традиційні мінеральні добрива в сільськогосподарському виробництві. Це дозволяє уникнути скидання в довкілля цього цінного органо-мінерального ресурсу та його забруднення.

Пшениця озима є однією з найважливіших продовольчих культур у світі, однією з основних культур сільськогосподарського виробництва, а її урожайність – важливим показником продуктивності галузі рослинництва. Підвищення її продуктивності має значний вплив на глобальну продовольчу та харчову безпеку.

Дигестат широко використовується як добриво, але має різний вплив на продуктивність різних сільськогосподарських культур. З дигестатом нині проводять багато досліджень в рослинництві, особливо із зерновими і овочевими культурами. Зазвичай встановлено, що його застосування може підвищити урожайність і поліпшити якість одержаної продукції, зменшити застосування мінеральних добрив і виробничі витрати [388]. В інших дослідженнях [406] було показано, що внесення дигестату істотно впливає на

збільшення врожайності багатьох сільськогосподарських культур, особливо на якість врожаю. При цьому вчені [277] дійшли висновку, що найвищий урожай формується, коли частка рисового дигестату замість мінерального добрива становить не більш як 75 %, а найвища врожайність була досягнута за частки пшеничного дигестату лише 50 %. У дослідженнях [310] вплив застосування дигестату на врожайність пшениці був значно вищий порівняно з контролем. Найвищої врожайності – 6,5 т/га було досягнуто за внесення 60 т/га дигестату та 150 кг/га карбаміду.

Внесення у різних комбінаціях дигестату з мінеральними добривами впливає на його ефективність. Так, пшениця озима після поливу дигестатом мала вищу урожайність на 10 %, ніж після поливу розчином карбаміду у воді. При цьому рослини пшениці були стійкішими до вилягання. Внесення бакової суміші дигестату з азотними і фосфорними добривами було на 21 % ефективнішим контролю, на 15 % – за внесення лише азотного добрива, і на 6 % за внесення лише фосфорних добрив [266].

Встановлено, що невеликі дози органічних добрив позитивно впливали на складові врожаю пшениці озимої – масу тисячі зерен, вміст білка й крохмалю. Примітно, що збільшення вмісту білка було пов'язане зі зменшенням вмісту крохмалю в зерні. За впливом на врожайність та якість зерна середні та високі дози органічних добрив як окремо, так і в поєднанні з мінеральними мали позитивний вплив [246].

У польовому досліді з міченим азотом з різною часткою дигестату в системі удобрення впродовж двох років поспіль було встановлено, що врожайність пшениці озимої була найвищою за 50%-ї заміни мінеральних добрив, або на 8 % порівняно з одноразовим внесенням добрив [277]. В іншому досліді за збільшення частки дигестату спостерігалось спочатку збільшення, а потім зменшення врожайності пшениці, тому 50%-ва заміна мінеральних добрив була найбільш прийнятною [390]. Зі збільшенням частки дигестату спостерігається інтенсивний ріст і засвоєння поживних речовин рослинами пшениці, дисбаланс вуглецю й азоту, пізнє досягання зерна, що спонукає до

зниження його маси і врожайності [259]. Це також було виявлено і в інших культур [294].

Оскільки з різних видів сировини для біогазового виробництва біохімічний склад дигестату, що утворюється в різні пори року змінюється, оптимальне поєднання та дозування азоту дигестату слід визначати комплексно – відповідно до родючості ґрунту, екологічних умов, інтенсивності виробництва, основної мети, особливостей сорту та поля [259].

Різне поєднання дигестату з мінеральними добривами впливає на ріст і розвиток рослин пшениці озимої. Як дигестат, так і мінеральні добрива підвищують її урожайність порівняно з контролем ( $p < 0,05$ ). Зі збільшенням частки дигестату до 50 % урожайність пшениці зростала, а потім, із подальшим зменшенням частки мінеральних добрив, почала знижуватися. Урожайність пшениці у варіанті з часткою дигестату 50 % була найвищою (9,8 т/га) порівняно з контролем, часткою 25 %, 75 і 100 % дигестату, і відповідно збільшувалась на 31 %, 14, 4 і 34 %. Поєднання цих удобрювальних продуктів у відношенні 1 : 1 оптимально забезпечує потреби пшениці озимої у поживних речовинах на різних стадіях росту та розвитку, сприяє формуванню високого рівня врожайності пшениці озимої [419].

В іншому досліді внесення дигестату і мінеральних добрив збільшувало врожайність пшениці озимої порівняно з контролем на 27 % – до 7,52 т/га [255]. При цьому були значні відмінності між ефективністю різних доз дигестату: спочатку врожайність зросла до 9,83 т/га за дози 50 т/га та суттєво знижувалась за дози 100 т/га. Аналогічні результати були одержані і в інших дослідженнях [311, 337], тоді як дані інших учених [258] показали, що найвищий урожай зерна формувався у варіанті досліді за основного внесення дигестату (25 % азоту) і додаткового весняного внесення азоту у вигляді карбаміду (75 %).

Дослідженнями [350] встановлено, що внесення дигестату в поєднанні з мінеральними добривами (відповідно 60 % + 40 %) не тільки сприяло підвищенню вмісту хлорофілу та фотосинтетичної активності листків, а й

забезпечувало достатню кількість продуктів фотосинтезу для збільшення висоти рослин. Фотосинтез є основним процесом формування сухої речовини, а відмінності у фотосинтетичній здатності різних рослин впливають на ріст і розвиток сільськогосподарських культур та формування економічно виправданого врожаю [276]. Оптимальне живлення пшениці озимої завдяки помірним підживленням на різних стадіях росту й розвитку може сприяти підвищенню чистої продуктивності фотосинтезу та продовжувати її у кінці вегетації і збільшувати урожайність зерна [423]. Особливо це важливо на стадії утворення та наливу, коли внесок фотосинтезу функціональних листків у формування зерна сягає понад 80 % [296].

Картопля, підживлена тричі дигестатом у період вегетативного росту, мала найвищу інтенсивність фотосинтезу, провідність продохів, міжклітинну концентрацію  $C-CO_2$  та швидкість транспірації під час накопичення крохмалю. Це сприяло кращому засвоєнню води і елементів живлення, синтезу органічних сполук і накопиченню сухої речовини [315].

Застосування дигестату на дині поліпшує фотосинтез, роботу продохів, подовжують період збирання та підвищує урожайність. Ефективність заходу також залежить від концентрації дигестату [307]. Він має хороший стимулювальний ефект для поліпшення фотосинтетичних характеристик, урожайності та якості яблук [402].

Застосування дигестату та мінеральних добрив може сприяти збільшенню вмісту мікроелементів і поліпшенню якості зерна пшениці озимої [261], борошна й тіста [309]. Вміст білка в зерні зростає за умови оптимального забезпечення рослин азотом і збільшення частки заміщення азоту дигестату добривом [223].

Застосування гноївки сприяло підвищенню урожайності кукурудзи в середньому на 40 %, а за додаткового внесення фосфорних добрив – навіть на 54 % порівняно з неудобреними ділянками [188].

Отже, з урахуванням актуальності застосування органічних добрив у рослинництві, дефіциту гною в переважній більшості господарств, що є

однією з причин зниження рівня родючості ґрунту, пошук сучасних технологічних рішень виготовлення органічного добрива з нетоварної продукції тваринництва та екологічні стратегії поводження з нею є важливим напрямом досліджень. Він потребує подальших розробок і практичної реалізації. Планування системи поводження з нетоварною продукцією є актуальною проблемою сільського господарства, яка потребує прийняття оптимальних технологічних рішень у поєднанні з еколого-економічними [159].

Дигестат є перспективним альтернативним методом поводження з пташиним послідом на птахофабриках з інтенсивним теплопостачанням. Фізичними, біологічними і термічними перетвореннями з дигестату або його фракцій можна отримувати продукти, які успішно використовують як добрива.

## **Висновки до розділу 1**

1. Нині кількість біогазових установок в Україні зростає з метою отримання енергетичної незалежності та більшої прибутковості виробництва, що відповідно сприяє збільшенню об'ємів виходу дигестату, як органічного добрива. З огляду на недостатню кількість органічних добрив для традиційного землеробства, дигестат може бути важливим нетрадиційним джерелом органічної речовини у ґрунті.

2. Агрохімічний склад і характеристики дигестату, отриманого на виході з біогазових установок, істотно залежать від виду і походження вихідної сировини, яка завантажується в метантенк, що потребує дослідження кожної його партії.

3. У зв'язку з активним розвитком птахівництва, а отже, й накопиченням значної кількості відходів, які, хоч і є цінною сировиною, але не завжди використовуються, актуальність проблеми охорони довкілля зростає. З урахуванням цього, актуальним є питання скорочення викидів

парникових газів від супутніх продуктів тваринництва, яке потребує ґрунтового дослідження та є невід'ємним аспектом у функціонуванні агропромислових підприємств.

4. Раціональне застосування органічних і біоактивних добрив на основі місцевих сировинних ресурсів є основою регулювання колообігу речовин у землеробстві та відновлення вмісту гумусу в ґрунтах. Різноманітність і специфіка різних органічних добрив вимагають теоретичного та технологічного обґрунтування їх застосування, яке повинно бути спрямовано на раціональне, екологічно безпечне використання, зменшення антропогенного навантаження на довкілля, підвищення продуктивності культур з відновленням органічної речовини ґрунтів.

5. Застосування дигестату під сільськогосподарські культури дозволяє вирішувати проблему його утилізації, а також сприяє забезпеченню рослин необхідними макро- й мікроелементами. Однак цей сировинний ресурс може містити забруднювальні речовини і політанти. З огляду на це, важливо знати закономірності формування продуктивності різних сільськогосподарських культур за різного застосування дигестату з урахуванням агроекологічного впливу на екосистеми і подальшого нарощування обсягів виробництва біогазу та стабілізації енергетичного балансу України.

6. Дигестат широко використовується як добриво, але має різний вплив на продуктивність різних сільськогосподарських культур. З дигестатом нині проводять багато досліджень у рослинництві, особливо із зерновими і овочевими культурами, але їх результати потребують уточнення в конкретних ґрунтово-кліматичних умовах.

7. Спільне використання органічних і мінеральних добрив є найкращим засобом досягнення високих урожаїв за низьких витрат і мінімальному негативному впливі на довкілля. Висока продуктивність комбінацій і нижча вартість внесених мінеральних добрив можуть стимулювати аграріїв до застосування дигестату.

8. Ймовірно, що використання дигестату для удобрення поліпшує властивості ґрунту, його азот позитивно впливає на зменшення втрат його сполук, а врожайність і якістю зерна не поступається пшениці озимій і кукурудзі, удобрених синтетичними мінеральними добривами.

Основні положення цього розділу викладені в таких наукових працях автора зі списку використаних джерел [43, 177, 181, 183, 187].

## РОЗДІЛ 2

### МЕТОДИКА ТА УМОВИ ПРОВЕДЕННЯ ДОСЛІДЖЕНЬ

#### 2.1 Методика проведення досліджень

Дослідження щодо вивчення можливості підживлення пшениці м'якої озимої рідким дигестатом, вихідним продуктом якого був курячий послід, проводили у 2021–2023 рр., а з удобренням кукурудзи – у 2022–2024 рр. у польових дослідах на землях с. Лукашівка Ладизинської міської ради у Бузько-Середньо-Дніпровському окрузі Лісостепової Правобережної провінції із географічними координатами 48°64' пн. ш. і 29°21' сх. д.

Зразки дигестату було відібрано у відокремленому підрозділі «Біогаз Ладизин», що входить до складу ТОВ «Вінницька птахофабрика», яка є одним з найбільших підприємств галузі. Основною сировиною для виробництва біогазу є курячий послід. При цьому використовується процес мікробної анаеробної ферментації. Температура бродіння субстрату контролюється в межах 40 °С. Час утримання, залежно від пори року, становить 40–45 діб. За цей період органічна речовина курячого посліду під дією анаеробних мікроорганізмів розкладається і виділяється біогаз та утворюється супутній продукт – дигестат. Оскільки поголів'я птиці та раціон її годівлі на фермах зазвичай був незмінним у період проведення досліджень, а процес бродіння залишався незмінним, фізико-хімічні властивості одержаного дигестату були відносно стабільними.

Хімічні та фізико-хімічні аналізи ґрунту, складу супутніх продуктів біогазового виробництва, курячого посліду і рослинних зразків виконували стандартизованими і загальноприйнятими методами з використанням сертифікованих приладів у спеціалізованих, акредитованих і сертифікованих лабораторіях Уманського НУ (№ РЯ0078/21 від 02.11.2021 р.), ПП «Західний



Буг» і ТОВ «Компанія землероб». У біолабораторії ТОВ «Агрофірма «Колос» проведено мікробіологічні дослідження курячого посліду.

У рідкому дигестаті визначали вміст: азоту – за ДСТУ 7911 [70], фосфору – на фотоколориметрі, калію – на полуменовому фотометрі [73], сульфатів [114], кальцію і магнію [113], мікроелементів – атомно-адсорбційним методом на спектрофотометрі С-115 та рідинної іонної хроматографії [65, 75, 76].

Підживлення пшениці озимої дигестатом проводили напровесні поверхнево різними дозами (30 м<sup>3</sup>/га, 50, 70 і 100 м<sup>3</sup>/га). За одержаними результатами першого року проведення досліджень дози внесення дигестату у схемі досліду було зменшено відповідно до 10 м<sup>3</sup>/га, 20 і 30 м<sup>3</sup>/га. За абсолютний контроль був варіант досліду без внесення добривальних продуктів. На ділянках досліду виробничого контролю підживлення пшениці озимої, як і дигестатом, проводили напровесні аміачною селітрою (100 кг/га), а також КАС-32 на стадії ВВСН 28–29 – загальна доза азоту 109 кг/га.

Загальна площа досліду становила 8–10 га, повторність варіантів досліду триразова, площа облікової ділянки 400 м<sup>2</sup>.

У польових дослідах з кукурудзою дигестат вносили як окремо (20 м<sup>3</sup>/га; 30; 40 і 50 м<sup>3</sup>/га), так і частину азоту мінеральних добрив (0 %, 50, 75, 100 %) замінювали азотом дигестату дозою відповідно 20 м<sup>3</sup>/га, 15, 10 і 0 м<sup>3</sup>/га. За виробничий контроль був варіант досліду з внесенням 200 кг/га азоту у вигляді аміаку водного (Nва). При цьому вміст у дигестаті інших макро- й мікроелементів не враховували. За абсолютний контроль був варіант досліду без внесення добривальних продуктів. У ґрунт також не вносили інші види добрив, крім передбачених схемою досліду. Це обґрунтовували дуже високим вмістом у ґрунті рухомих сполук фосфору й калію та низьким – азоту легкогідролізованих сполук. Добрива вносили під основний обробіток ґрунту (оранка). Агрегат для внесення дигестату обладнаний дисковим лушпильником, що дозволяє одночасно його заробити на глибину 10–15 см. Оранку проводили

на глибину 28–30 см. Загальна площа дослідів становила 8–12 га, повторність варіантів дослідів триразова, площа облікової ділянки 2500 м<sup>2</sup>.

Дослідження проводилися згідно загальноприйнятих методик з наукових досліджень [89]. Для вимірювання значень забезпеченості азотом пшениці озимої у фазі кущіння та колосіння рослин використовували портативний прилад «N-тестер» [39].

У рослинних зразках визначали: вміст сухої речовини – термогравіметричним методом [80]; азоту – за ДСТУ 7911 [70], фосфору – на фотоколориметрі, калію – на полумєневому фотометрі [73], сульфатів [114], кальцію і магнію [113], мікроелементів – атомно-адсорбційним методом на спектрофотометрі С-115 та рідинної іонної хроматографії [65, 75, 76].

Облік урожаю пшениці м'якої озимої і кукурудзи проводили методом суцільного збирання [89]. У зерні визначали: вологість – за ДСТУ 29144 [85], масу 1000 зерен – за ДСТУ ISO 520 [83], натуру зерна – за ДСТУ ГОСТ 10840 [84], склоподібність зерна – за допомогою діафаноскопа [117], вміст білка – за ДСТУ 4117 [58], вміст і якість клейковини – за ДСТУ ISO 21415–1 [81], число падіння – за ДСТУ ISO 3093 [83]. Ураження зерна хворобами визначали за [118]. Показники якості зерна кукурудзи (вміст білка, крохмалю, жиру) визначали методом інфрачервоної спектроскопії [58].

Зразки ґрунту відбирали згідно вимог ДСТУ 4287 [59] і ДСТУ ISO 11464 [79]. У ньому визначали такі показники:

- вологість ґрунту – термогравіметричним методом за ДСТУ ISO 11465 [80];

- вмісту гумусу – згідно з ДСТУ 4289 [60];

- кислотність ґрунту рН<sub>KCl</sub> – за ДСТУ ISO 10390 [77];

- гідролітичну кислотність (Нг) – за ДСТУ 7537 [64];

- ємності катіонного обміну та насиченості основами з використанням розчину хлориду барію – за ДСТУ ISO 11260 [78];

- вміст азоту легкогідролізованих сполук за методом Корнфілда згідно з ДСТУ 7863 [67];

– визначення мінеральних сполук азоту – за ДСТУ 4729 [62];

– рухомі сполуки фосфору й калію – вилученням їх розчином 0,5 Н оцтової кислоти з наступним фотоколориметруванням за модифікованим методом згідно з ДСТУ 4115 [57];

Для проведення мікологічних досліджень проводили відбір і підготовку зразків ґрунту з дотриманням стандартних вимог пробопідготовки й зберігання проб у лабораторних умовах, згідно з ДСТУ 4287 [59]. Ґрунтові проби досліджувались у шестиразовій повторності. Для встановлення кількісного та видового складу мікобіоти ґрунту за внесення різних доз дигестату, проводили його мікологічний аналіз методом газонів [20]. При цьому брали 0,001 г ґрунту і добавляли 0,1 дм<sup>3</sup> води. Підрахунок кількості грибів у чашках Петрі проводили на 5–7-му добу, а видову належність визначали на 10–14-ту добу.

Оптимальну систему удобрення визначали за показниками агрохімічної і економічної ефективності з урахуванням витрат на застосування удобрювальних продуктів, збирання та доробку додаткового врожаю за технологічними картами і цін реалізації зерна в IV кварталі 2025 року [39].

Для статистичної обробки одержаних експериментальних даних результатів проведених досліджень і визначення їх достовірності використовували пакет стандартних програм (ПІК «Agrostat», MSOfficeExcel, Statistica 10.0) і дисперсійний аналіз.

## **2.2 Кліматичні та агрометеорологічні умови**

З галузей сільськогосподарського виробництва рослинництво найбільш залежне від погодних умов. У період вегетації рослини перебувають під значним впливом метеорологічних чинників, які безпосередньо впливають на їх ріст і розвиток [304], тому в цей період важливо фіксувати агрометеорологічні умови [226]. Вважається [140], що оцінювання

формування продуктивності культур не буде об'єктивним, якщо не враховувати вплив чинників довкілля.

Прогнозується, що в майбутні кліматичні умови залишаться сприятливими для вирощування пшениці озимої. Проте несприятливі погодні явища збільшать мінливість її продуктивності. Періодичні посухи і високі середньодобові температури сприяють збільшенню випаровування води з ґрунту, особливо в теплі періоди. Це знижує поглинання поживних речовин рослинами та ефективність добрив.

Глобальне потепління має прямий вплив на особливості росту, розвитку та формування врожаю всіх сільськогосподарських культур. Підвищення температурного режиму впливає на кількість опадів, призводить до теплових аномалій, зростає прояву екстремальних стихійних лих і явищ. Також спостерігається зниження вологості повітря і як наслідок – виникнення частих ґрунтової і повітряної посух [147]. Основними чинниками прояву потепління є стале підвищення температури, збільшення випаровування вологи на тлі зменшення кількості опадів. Додатковими чинниками, які також можуть впливати на зміну клімату є вологість повітря, атмосферний тиск, сила вітру та хмарності [162].

Вивчення будь-яких агротехнологічних заходів не можливе без врахування агрокліматичних ресурсів регіону з огляду на абіотичні чинники, які у взаємодії з варіантами досліду визначають їх ефективність [2]. Аналіз взаємодії гідротермічних складових із процесами росту й розвитку культури на тлі застосування певних агротехнологічних заходів є чинником, який дає можливість виділити оптимальний варіант у певному регіоні з огляду на можливе лімітування реалізації позитивного ефекту від досліджуваного агрозаходу через несприятливі погодні умови [22].

Наслідки впливу глобальних змін клімату на продуктивність сільськогосподарських культур неоднозначні: може спостерігатися підвищення продуктивності одних культур, таких як озимі зернові та

теплолюбні (кукурудза, соняшник) і зниження – інших культур, що ліпше розвиваються за помірного клімату [1].

Агротехнології удосконалювалися впродовж тривалого часу і в першу чергу були направлені на впровадження нових сортів і гібридів та оптимізації рівня їх мінерального живлення. Однак найважливішими залишаються чинники довкілля, які суттєво впливають на формування продуктивності сільськогосподарських культур. Це свідчить про необхідність більше приділяти їм уваги та ефективному використанню в умовах зміни клімату. Тому нові агротехнології повинні забезпечувати оптимальне удобрення культур і бути безпечними для довкілля.

Клімат Правобережного Лісостепу помірно-континентальний з частково вираженою сезонною контрастністю [2]. Холодний період починається в кінці листопада, а закінчується – на початку березня. Тривалість зими становить близько 100 діб з тривалістю сонячного сяйва у Правобережному Лісостепу до 185 год. За сумою від’ємної температури, відповідно до шкали суворості зими, визначається як регіон з м’яким холодним періодом (менше – 500 °C).

Перехід середньодобової температури через +5 °C весною відбувається на початку квітня, а восени – у кінці жовтня–на початку листопада [134]. Період активної вегетації – це частина року (період між датами переходу температури повітря через 10 °C навесні та восени), коли відбувається інтенсивний ріст і розвиток рослин, найбільші їх водоспоживання і транспірація, досягання врожаю [96].

Характерними кліматично-погодними явищами у Правобережному Лісостепу є тривалі періоди без опадів, що зменшує запас продуктивної вологи у ґрунті, особливо на період сівби культур пізнього строку або озимих, а також інтенсивні зливові опади, що суттєво позначається на рості й розвитку рослин. Спостерігається зростання в літній період кількість днів з надвисокими температурами понад 30 °C, що знижує врожайність і пришвидшує досягання культур [139].

Сприятливий температурний режим у пізньоосінній і зимовий періоди сприяє добрій перезимівлі озимих культур, але впливає на строки їх сівби. Це також зменшує глибину промерзання ґрунту і сприяє кращому поглинанню ним вологи [4].

Територія Вінничини за режимами агрокліматичних умов поділяється на три райони: північно-східний, центральний та південний [134]. На підставі даних [2] можна зробити таку середньобогаторічну кліматичну характеристику Ладжинському району Вінницької області. Середньобогаторічна тривалість вегетаційного періоду 200–205 діб, сума активних температур 2671–2780 °С, а ефективних ( $> 5$  °С) – 1949–2059. Середньорічна сума опадів 580–630 мм (360–420 мм за вегетаційний період, улітку – 80–90 мм/міс., взимку – 30–35 мм/міс.).

Кількість опадів у регіоні відрізняються за характером розподілу за місяцями, по території, інтенсивністю тощо. Проте є загальні закономірності їх розподілу. У січні й лютому випадає найменша кількість, а з березня відбувається поступове збільшення. Найбільша кількість опадів випадає в травні–червні. У серпні – зменшується, а у вересні дощить ще менше. В листопаді–грудні кількість опадів зменшується порівняно з вереснем. Місячна кількість опадів в окремі роки суттєво змінюється, а також відрізняють великою мінливістю від року до року [96].

У Правобережному Лісостепу опади теплої частини року переважають над опадами холодної частини року. Максимальна місячна кількість опадів припадає на червень або липень. Найменше опадів випадає в лютому. Місячні мінімуми опадів складають 0–10 мм [10]. Також у Правобережному Лісостепу нараховується в середньому від 30 до 40 діб з опадами менш як 5 мм. Найбільш тривалі опади взимку. В річному ході найбільша мінливість місячної кількості опадів спостерігається влітку, найменша – взимку [96].

Опади, що випадають у теплу пору року, зазвичай розділяються тривалим бездощів'ям. Це є основною причиною посушливих явищ, які зазвичай завдають шкоди галузі рослинництва. Ознаки посушливості (стала

підвищена температура, понижена відносна вологість повітря) починають проявлятися в середньому з 10-ї доби після припинення опадів. Незначні дощі, що випадають після цього, не переривають посушливості, оскільки швидко випаровуються. Мінімальна кількість опадів, що переривають тривалий період без дощу, складає 5 мм, якщо вони випадають упродовж 1–5 діб [96].

Важливою характеристикою теплового режиму території є суми температур, оскільки за їх допомогою зазвичай встановлюють потребу сільськогосподарських культур у теплі. Суми температур за період зі стійкими температурами вище 5 °С характеризують кількість тепла, що одержують рослини за весь період вегетації, а вище 10 °С – дають кількість тепла за період вегетації теплолюбних культур. Середньобагаторічна річна сума активних температур вище 5 °С становить 2990, вище 10 °С – 2660. На величину сум температур також впливають місцеві умови – пересіченість рельєфу, його форма, експозиція. Навіть за незначної зміни місцевих умов зміна сум температур сягає 100–150 °С. В окремі роки суми температур м о ж у т ь змінюватися в широких межах [169].

Середньорічна температура повітря 6,7–7,0 °С, мінімальна і максимально температура повітря відповідно сягає –33,4 і +38 °С. Перші осінні заморозки можуть спостерігатися 6–7.10, а останніх весняних – 23–25.04. Тривалість періоду зі сніговим покривом 87–90 діб з середньою максимальною глибиною снігового покриву 14–15 см. Ґрунт зазвичай промерзає до 56 см.

Одним з основних показників, який впливає на вибір оптимального строку сівби кукурудзи та інших теплолюбивих культур, є термічний режим ґрунту. Він визначається температурними умовами повітря і, насамперед, надходженням сонячної радіації. Нагрівання і охолодження ґрунту залежить від його теплофізичних властивостей, гранулометричного складу, структури, вологості. Значний вплив також рельєф місцевості, рослинний покрив тощо. Значна частина тепла ґрунту витрачається на випаровування води з поверхні, а решта передається вглиб по його профілю [96].

Дані про погоду в умовах проведення дослідів були отримані з сусідньої метеостанції Умань (48°767' пн. ш. і 30°232' сх. д.). У роки проведення досліджень спостерігались відмінності погодних умов від середньобагаторічних показників регіону (додаток В.1–В.3).

Упродовж січня 2020–2024 рр. середньомісячна температура повітря була вище кліматичної норми на 1,8–3,6 °С. У лютому за досліджуваний період лише у 2023 році вона була на 0,2 °С нижчою норми. Протягом березня та квітня середньомісячна температура повітря відповідно була 5,1 °С тепла у 2023 році і 13 °С – у 2024 році.

У квітні була зафіксована максимально висока температура повітря – 13 °С, що на 3,3 °С вище кліматичної норми. Температура травня була близькою до середньобагаторічної у 2023 і 2024 роках, а в 2021 і 2022 році була нижчою кліматичної норми відповідно на 1,4 і 0,9 °С. У червні найбільш спекотними були умови 2024 року. Липень відзначався найвищою середньодобовою температурою плюс 24,3 °С у 2024 році. Також у цьому році був найтеплішим за період проведення досліджень серпень.

Восени 2020 р. за температурою повітря спостерігали суттєве перевищення кліматичної норми – на 6,7 °С. При цьому у вересні випала достатня кількість опадів (+38,5 мм до норми), що покрити дефіцит опадів влітку. У зв'язку з цим сівбу пшениці озимої було проведено в першій декаді жовтня з відновленням запасі вологи в орному шарі ґрунту. За осінній період вегетації пшениці озимої випало лише 100,9 мм опадів із яких більш як 40 % – були непродуктивні. Тому при вході у зиму загальний стан пшениці озимої був слабкий, фаза розвитку – 2–3 листки, коренева система слаборозвинена.

У період від початку відновлення весняної вегетації та до фази повної стиглості в 2021 році сумарна кількість опадів становила 243,4 мм, при чому 104,7 мм з них випало у червні, що спричинило вилягання пшениці озимої у варіантах досліді з внесеним дигестатом. У 2021 році впродовж березня спостерігали аномально прохолодну погоду зі значними змінами середньодобових температур. Інтенсивність опадів була нерівномірною та



різної інтенсивності. Квітень також був з нестійкою прохолодною погодою, в окремі періоди з мінусовою температурою на тлі достатнього вологозабезпечення (175–192 % від кліматичної норми). Травень мав нерівномірний розподіл атмосферних опадів і тепла зі значною амплітудою коливання температур. У червні та липні на тлі інтенсивного наростання середньодобових температур вище +30 °C спостерігався нерівномірний розподіл атмосферних опадів.

Дефіцит зволоження на початку вегетації пшениці озимої компенсувався достатньою кількістю опадів упродовж наступних періодів росту й розвитку рослин і теплою погодою. Дощова погода в липні негативно не вплинула на формування продуктивності рослин, проте перешкоджала збирання врожаю.

Друга половина липня та серпень характеризувалися високими амплітудними змінами опадів і температури. У 2021 році на тлі підвищення середньомісячної температури у червні–серпні на 0,2–2,3 °C сумарна кількість опадів за вегетацію становила кліматичній нормі. Прохолодними у 2021 році були погодні умови у березні–травні. Середньомісячна температура квітня була меншою від кліматичної норми на 2,3 °C, травня – на 1,4 і вересня – на 1,5 °C, натомість у червні перевищила багаторічний показник – на 0,8 °C і липні – на 2,3 °C. За шкалою Селянинова вересень 2021 року характеризувався як середньопосушливий. Отже, погодні умови року були сприятливі для вирощування пшениці озимої, забезпечили високого врожаю рослин та сприяли формуванню його якості.

Осінній період 2021 року був посушливим і прохолодним, тому сходи пшениці озимої були нерівномірними і зрідженими. Значна кількість опадів у грудні (91,2 мм) за відносно високих середньодобових температур повітря (–1 °C) сприяли пришвидшенню ростових процесів у рослин, що перед цим гальмувались. Тепла й малосніжна зима сприяла задовільній перезимівлі озимих. Відновлення весняної вегетації пройшло вже на початку березня. У 2022 році перевищення середньомісячної температури у червні–серпні становило 0,1–1,6 °C. Загалом погодні умови 2021–2022

сільськогосподарського року були несприятливими для формування високої продуктивності сільськогосподарських культур. Основною причиною був суттєвий дефіцит опадів, який на кінець року склав 217 мм.

За кількістю опадів (583,5 мм) 2022–2023 сільськогосподарський рік був близьким до кліматичної норми. Проте їх розподіл упродовж вегетації був нерівномірним. Це не дозволило рослинам пшениці озимої і кукурудзи цілком реалізувати потенціал продуктивності. Погодні умови 2022 року відзначалися незначним підвищенням середньодобової температури зі зменшенням кількості опадів за вегетацію на 15 мм. Середня температура за вегетаційний період становила 15,2 °С, сума опадів – 383 мм. Середньомісячна температура квітня була менша від кліматичної норми на 0,9 °С, натомість у березні перевищила багаторічний показник – на 2,6 °С, серпні – на 2,7 °С. Упродовж вегетації опади випадали рівномірно, окрім осені, яка була надмірно вологою. У вересні випало 99,2 мм опадів, що було вищим від середнього багаторічного показника на 38,2 мм. Найбільш посушливим був червень, що відповідало середньому рівню посушливості. Натомість жовтень і листопад були надмірно вологими, що подовжувало вегетацію рослин. В цілому, погодні умови сприяли формуванню високої біологічної продуктивності сільськогосподарських культур.

У вересні 2022 року був достатній рівень вологозабезпечення. Це дозволило вчасно провести сівбу пшениці озимої, а теплі умови жовтня сприяли формуванню її дружніх сходів. Аномально теплими і майже безсніжними видалась зима й початок весни 2023 року. Це дозволило рослинам сформувати оптимальну вегетативну масу і подовжило період весняного кушіння.

Погодні умови 2023 року відзначались високим температурним режимом, зменшенням кількості опадів та їх нерівномірним розподілом упродовж вегетації. Середня добова температура за вегетацію становила 16,9 °С з перевищенням кліматичної норми на 2,1 °С, натомість кількість опадів була меншою.

У 2023 році середньомісячна температура травня була на рівні середньобогаторічного показника, червня – на 0,6 °С, липня – на 0,4, серпня – на 2,7 і вересня – на 3,9 °С вищою. Найбільш посушливі умови були у березні, травні та червні. Незважаючи на строкатість погодних умов, вони були сприятливими для росту й розвитку сільськогосподарських культур і забезпечували формування їх високої біологічної продуктивності.

У 2023 році перевищення середньомісячної температури у червні–серпні становило 0,4–2,7 °С за сумарної кількості опадів на рівні кліматичної норми. Посушливі погодні умови травня та червня негативно вплинули на процеси росту й розвитку сільськогосподарських культур, формування й наливу зерна пшениці озимої.

За осінній період 2023 року випала достатня кількість опадів, що сприяло дружнім сходам пшениці озимої і оптимальній їх перезимівлі. За теплою із надмірною кількістю опадів весняного періоду 2024 року відбулося раннє відновленню весняної вегетації рослин. Вони добре розкущилися, а фаза колосіння–цвітіння настала у другій декаді травня. Впродовж червня–липня був недобір опадів на рівні 74,6 мм до норми, що в поєднанні з теплою погодою призвело до посушливих умов та зниження показників продуктивності сільськогосподарських культур.

До додаткових метеорологічних параметрів, що також мають вплив на ріст, розвиток і продуктивність сільськогосподарських культур належать вологість повітря (додаток В.3).

Аналіз помісячної вологості повітря за період 2020–2024 рр. показав діапазон 62–93 %. Найбільш вологими були: грудень – 86–93 %, січень та листопад – 84–89 та лютий – 76–83 %, сухими – квітень – 67–80 %, серпень – 56–71, травень – 56–73 та вересень – 62–79 %. Визначальним чинником на формування вологості повітря у певні місяці є температура повітря і в меншій мірі – сума опадів у зазначені часові проміжки [162].

Аналіз динаміки вологості повітря впродовж періоду проведення досліджень становила від 61 до 78 % за кліматичної норми 76 %. Найбільшу

вологість повітря було зафіксовано у 2020–2021 році – 78 %. Чинником впливу на таку вологість повітря у зазначений рік була найбільша абсолютна сума опадів упродовж усього періоду проведення досліджень.

Найнижча вологість повітря була зафіксована у 2023–2024 сільськогосподарському році – 61 %. Причинами цього була найнижча абсолютна сума опадів упродовж року та дуже висока середньорічна температура повітря.

Отже, за час проведення досліджень умови температурного режиму, кількість і характер випадіння опадів варіювали. Слід зауважити, що погодні умови за період досліджень знаходились у межах норми відхилень для умов нестійкого зволоження. Отже, за аналізом погодних умов 2020–2024 років можна зробити висновок, що в період проведення досліджень, за загального підвищення температурного режиму відносно кліматичної норми, в окремі періоди спостерігалися значні зміни за вологозабезпеченістю, як у сторону надмірного зволоження, так і в сторону його дефіциту. Проте, в цілому погодні умови відповідно до представлених агрометеорологічних даних у роки проведення досліджень можна охарактеризувати як відносно сприятливі для росту й розвитку основних сільськогосподарських культур як за характером зволоження, так і за характером суми ефективних температур, а певна їх відмінність у період вегетації дозволяє використати абіотичну складову для оцінювання отриманих даних для вирощування та аналізу продуктивності пшениці озимої і кукурудзи.

### **2.3 Ґрунтові умови**

Правобережний Лісостеп є одним із найбільш продуктивних регіонів за сільськогосподарським потенціалом. Ґрунтовий покрив її складний, місцями строкатий. Характерною особливістю складу ґрунтоутворювальних порід є їх літологічна одноманітність на території. За винятком заплавних, піщаних терасових і сильноеродованих ґрунтів, що залягають на елювії корінних

порід, решта ґрунтів сформувалась на лесах і лесовидних суглинках. Характерною їх особливістю є карбонатність, сприятливі фізичні та фізико-хімічні властивості, що й визначає агрономічноцінні властивості ґрунтів регіону.

Ґрунти Лісостепової Правобережної провінції сформовані в умовах нестійкого атмосферного зволоження, складного розчленованого рельєфу під впливом широколистяної лісової і трав'яної різнотравно-злакової рослинності. Тут найбільш поширені сірі лісові та темно-сірі опідзолені ґрунти, чорноземи опідзолені й типові [138]. По долинах річок поширені лучні і лучно-болотні ґрунти, зустрічаються болотні.

Генетично профіль сірих лісових ґрунтів характеризується чітким розподілом за елювіально-ілювіальним типом. Акумуляція гумусу проходить у верхньому неглибокому гумусо-елювіальному горизонті. За вмістом гумусу опідзолені ґрунти суттєво відрізняються від сірих лісових ґрунтів. В гумусово-елювіальному горизонті темно-сірих опідзолених ґрунтів його міститься 4,29, а в чорноземах опідзолених – 5,19 %. Опідзолені ґрунти мають різний гранулометричний склад [138].

Ґрунт дослідних полів – темно-сірий лісовий середньо суглинкового гранулометричного складу (за класифікацією FAO/WRB, 2022 – Phaeosems) [280]. У цьому ґрунті горизонт mollic темний, порівняно з горизонтом chernic менш структурований і гумусований. Насиченість основами до глибини 100 см більш як 50 %. Діагностичний горизонт calcic відсутній. Вміст гумусу в орному шарі 1,5–1,8 %, реакція ґрунтового розчину середньокисла ( $pH_{KCl}$  4,9–5,2), щільність оптимальна – 1,23–1,28 г/см<sup>3</sup>. Вміст у ґрунті азоту легкогідролізованих сполук (за методом Корнфілда) становив 81–98 мг/кг, рухомих сполук фосфору й калію (за методом Чирикова) – відповідно 198–212 і 175–186 мг/кг.

## 2.4 Агротехнологічні особливості вирощування пшениці озимої і кукурудзи

Під час закладання дослідів з вивчення ефективності застосування дигестату під кукурудзу використовували агрегат Holmer Terra Variant 585 для його внесення (рис. 2.1).



Рис. 2.1 Агрегати для внесення дигестату Holmer Terra Variant 585

Багатофункціональний самохідний агрегат потужністю 585 к. с. німецького виробництва для внесення органічних добрив повинен бути обладнаний додатковими агрегатами компанії Zunhammer Gülle-Technik (на рис. 2.1 цистерна об'ємом 21 м<sup>3</sup>, розподільник, хобот для закачування дигестату за допомогою вакууму, вакуумний насос).

Агрегат Holmer Terra Variant 585 має точне дозування, доза внесення дигестату прописується в комп'ютері, чітко ним контролюється та не залежить від швидкості руху агрегату по полі завдяки зміні продуктивності вакуумного



насосу. Мінімальна доза внесення дигестату агрегатом Holmer – 10 м<sup>3</sup>/га, але більш якісна – за мінімальної дози 20 м<sup>3</sup>/га через велику відстань між лапами глибокорозпушувача (45 см) та відсутність перекриття на глибині внесення.

У досліді вирощували пшеницю м'яку озиму сорту Артист (оригіатор компанія DSV) після соняшнику. Після його збирання проводили дискування у два сліди під кутом 35 градусів, на глибину 5 см (Gregoire-besson DXRV), вносили КАС-32 (180 кг/га) і проводили передпосівну культивуацію на глибину 3–4 см (Horsch Tiger).

Насіння протруювали препаратом ВАЙБРАНС ІНТЕГРАЛ 235 FS, ТН – 2 л/т. Сівбу пшениці озимої проводили на глибину 2,5–3,5 см сівалкою AMAZONE CITAN нормою висіву 4,2 млн/га з одночасним внесенням у рядки РКД 6–22–5 дозою 60 кг/га.

В осінній період проводили гербіцидну: Тру (трибенурон-метил, 750 г/кг) – 0,03 кг/га + ПАР Тренд 90 (етоксилат ізодецилового спирту 90%) – 0,25 л/га та інсектицидну обробку посівів: Фастак (альфа-циперметрин, 100 г/л).

Напроресні, згідно схеми досліді, проводили підживлення пшениці озимої дигестатом (рис. 2.2, 2.3).



Рис. 2.2 Якість поверхневого внесення дигестату на пшениці озимій





Рис. 2.3 Межа внесено/невнесено дигестату напровесні на пшениці озимій

У весняний період проводили захист і підживлення посівів пшениці озимої за такою схемою:

1). Гербіцидний захист: Тру (трибенурон-метил, 750 г/кг) – 0,03 кг/га + ПАР Тренд 90 (етоксилат ізодецилового спирту 90%) – 0,25 л/га. Інсектицидний обробіток: Фастак (альфа-циперметрин, 100 г/л) – 0,2 л/га. Фунгіцидний захист: Фалькон (тебуконазол, 167 г/л + триадименол, 43 г/л + спіроксамін, 250 г/л) – 0,6 л/га. Фоліарне підживлення: карбамід – 3 кг/га, сульфат магнію – 3 кг/га, Квантум хелат Цинку – 1 л/га.

Посіви у досліді обробляли регулятором росту рослин Стабілан (хлормеквату хлорид, 750 г/л) – 1 л/га у фазу ВВСН 30–31.

2). Фунгіцидний захист: Солігор (протіоконазол, 53 г/л + тебуконазол, 148 г/л + спіроксамін, 224 г/л) – 1 л/га. Інсектицидний захист: Фастак (альфа-циперметрин, 100 г/л) – 0,2 л/га. Фоліарне підживлення: карбамід – 3 кг/га, сульфат магнію – 3 кг/га

3). Фунгіцидний захист: Оріус (тебуконазол, 250 г/л) – 1 л/га + Престо (клотіанідин, 200 г/л + лямбда-цигалотрин, 50 г/л) – 0,4 л/га + ПАР Супер Мачо



(модифікований поліефір) – 0,1 л/га. Фоліарне підживлення: карбамід – 3 кг/га, сульфат магнію – 3 кг/га.

На контрольних ділянках підживлення посівів пшениці озимої проводили напровесні аміачною селітрою (100 кг/га) та сульфатом амонію (80 кг/га) двома проходами розкидача та КАС-32 у фазу ВВСН 28–29 – загальна доза азоту 109 кг/га.

Попередником кукурудзи на дослідних ділянках була кукурудза. Основний обробіток ґрунту був у вигляді оранки на глибину 28–30 см (плуг з передплужниками Lemken DIAMANT).

Ранньовесняне вирівнювання зябу проводили боронування (McFARLANE, ширина захвату 18 м), передпосівну культивуацію – на глибину 4,5–5,0 см (Bourgault 8810). Висівали гібрид кукурудзи ДКС 3972 (ФАО 300) сівалкою MF-555 Precision Planting нормою висіву – 68 тис/га.

Ґрунтовий гербіцид Харнес (ацетохлор, 900 г/л) у нормі 3 л/га вносили у фазі кукурудзи ВВСН 00–03, а страхові гербіциди – Мілагро (нікосульфурон, 40 г/л) – 1,25 л/га + Пріма (2,4 2етил-гексиловий ефір, 452,5 г/л + флорасулам, 6,25 г/л) – 0,6 л/га у фазі ВВСН 13–15.

Для поліпшення мікроелементного живлення рослин цинком посіви на стадії ВВСН 16–17 обприскували баковою сумішшю Квантум хелат цинку – 1 л/га + карбамід – 3 кг/га + сульфат магнію – 3 кг/га.

На стадії розвитку рослин кукурудзи ВВСН 16–17 проводили міжрядний обробіток ґрунту на глибину 10–12 см культиватором КРН–5,6.

Інсектицидний захист посівів кукурудзи проводили у фазі розвитку ВВСН 57–59) препаратом Престо (клотіанідин, 200 г/л + лямбда-цигалотрин, 50 г/л) – 0,4 л/га + ПАР Супер Мачо (модифікований поліефір) – 0,1 л/га.

## **Висновки до розділу 2**

1. Характеристика темно сірого опідзоленого ґрунту господарства, місця проведення польових досліджень є типовими для Правобережного Лісостепу,

показує придатність для вирощування зернових культур, у тому числі пшениці озимої і кукурудзи.

2. Агromетeоролoгiчнi умoви у роки проведення досліджень (2020–2024), були типовими для підзони Правобережного Лісостепу, хоч і мали певні відхилення. У вегетаційні періоди вони характеризувались підвищенням середньодобової температури і зменшенням кількості опадів і були сприятливими для вирощування основних сільськогосподарських культур, у тому числі пшениці озимої і кукурудзи. Це дозволило об'єктивно оцінити вплив систем удобрення з використанням дигестату, що вивчалися в досліді, на поживний режим ґрунту, процеси росту, розвитку та формування продуктивності пшениці озимої і кукурудзи. Досліджень дозволяють розробити систему їх удобрення, яка забезпечує сталі врожаї та високу продуктивність культур.

3. Спостереження, обліки відбір зразків ґрунту й рослин і проведення їх аналізів, що використані в дисертаційній роботі, виконували згідно стандартизованих і загальноприйнятих методик. Технології вирощування пшениці озимої і кукурудзи у досліді була загальноприйнятою для регіону, крім систем удобрення, що вивчалися в досліді, що дозволяють отримати об'єктивні дані.

Основні положення цього розділу викладені в таких наукових працях автора [178, 181, 186, 187].

## **РОЗДІЛ 3**

### **ФІЗИКО-ХІМІЧНІ ОСОБЛИВОСТІ СУПУТНІХ ПРОДУКТІВ ВИРОБНИЦТВА БІОГАЗУ ПОРІВНЯНО З ІНШИМИ ОРГАНІЧНИМИ ДОБРИВАМИ**

#### **3.1 Фізико-хімічна характеристика супутніх продуктів виробництва біогазу**

Належне використання поживних речовин сприяє збільшенню біомаси рослин і вмісту органічних речовин у ґрунті та поліпшенню його здоров'я. Втім вплив добрив, якщо вони використовуються не належним чином, може мати негативний вплив на наслідки глобальної зміни клімату, деградацію ґрунту та забруднення водних об'єктів і якість повітря, потенційну шкоду для здоров'я людини, тварин і ґрунту [119, 378].

Склад дигестату (вміст елементів живлення та органічних речовин) може змінюватися залежно від таких чинників, як корми і утримання птиці, а також технології її вирощування. Отриманий дигестат, залежно від сировини, що використовується для виробництва біогазу, може сильно відрізнятися за своїм макро- та мікроелементним складом [356]. Дигестат також можна використовувати як сировину для виробництва різних удобрювальних продуктів, але необхідно знати його властивості, щоб створити комерційно корисний удобрювальний продукт із доданою вартістю.

Для використання дигестату як органічного добрива його зазвичай поділяють на тверду (суху) та рідку фракції. Вони відрізняються вмістом сухої речовини та хімічним складом, що, у свою чергу, може по-різному впливати на формування врожаю сільськогосподарських культур [271].

Дигестат багатий органічними речовинами, макро- (азотом, фосфором, калієм і сіркою) й мікроелементами, які необхідні для росту та розвитку

рослин [367]. Концентрація таких елементів живлення надає значні можливості використання дигестату як біодобрива для рослин [367].

У дигестатах невелика частина азоту входить до складу різних за інтенсивністю до розкладання органічних сполук. Частина з них уже гуміфіковані. Ці особливості дигестатів впливають на властивості ґрунту та визначають їх ефективність. Застосування органічних добрив дозволяє замінити мінеральні добрива або зменшити у них потребу, що може мати позитивний вплив на економічну ефективність і довкілля [262]. Встановлено, що удобрення дигестатом може бути ефективним способом зменшення непродуктивних втрат азоту порівняно з карбамідом за тих самих доз внесення азоту [383]. Проте є дослід, де внесення дигестату порівняно з мінеральними добривами не завжди давало достовірний приріст урожайності [383]. Позитивна ефективність застосування органічних добрив зазвичай має акумулятивний ефект і відчувається через кілька років [284].

Використання азоту різних органічних джерел (рослинні рештки, зелені добрива, гній, послід, енергетичні відходи, компост тощо), поглинання сполук азоту та його інтенсивність мають значний вплив на якість ґрунту, живлення рослин і формування продуктивності культур [212]. Відходи енергетичної промисловості (рослинного та тваринного походження), оброблені анаеробно (дигестати), мають високий вміст азоту та низький вміст вуглецю [217]. Це сприяє процесам мінералізації дигестатів у ґрунті, частина  $N-NH_4^+$  цього добрива перетворюється на  $N-NO_3^-$ . На цей процес впливає вологість і температури ґрунту, оскільки це визначає активність уреаз, розвиток нітрифікувальної бактеріальної спільноти і швидкість нітрифікації у ґрунті [372]. Отже, дигестати можуть становити екологічний ризик через звітрювання аміаку або вимивання нітратів (як й інші добрива, що містять ці сполуки).

Поживні речовини, що містяться в дигестаті, знаходяться у формі, яка легко засвоюється рослинами. Приблизно 35–81 % загального вмісту азоту в дигестаті – це аміак ( $N-NH_4^+$ ) у формі, доступній для рослин. Крім того,

дигестат є рослинним добривом, що конкурує з мінеральними добривами. Присутні в дигестаті органічні речовини позитивно впливають на фізичні та хімічні властивості ґрунту та на його родючість загалом [229]. Дигестат, порівняно з внесенням еквівалентної кількості гною великої рогатої худоби, збільшує вміст азоту мінеральних сполук у ґрунті на 30–40 % [285].

Дигестат виконує кілька функцій і має корисний вплив як на поліпшення властивостей ґрунту, так і сприяє росту рослин. Він відіграє важливу роль у підвищенні ефективної родючості ґрунту, забезпечує колообіг поживних речовин у ґрунті, трансформацію вуглецю та збереження структури ґрунту [346]. Дигестат може мати менш тривалу дію, що пов'язано з мінералізацією або мікробною активністю [195].

Дослідження складу дигестатів показало, що за більш посушливих погодних умов вміст важких металів у них був нижчим. Зміни вмісту загального азоту були нижчими у дигестаті ( $V = 19 \%$ ), але зазвичай його концентрація була вищою у вихідному продукті (свинячому гною). Частка азоту мінеральних сполук ( $N-NH_4^+ + N-NO_3^-$ ) від вмісту загального азоту змінювалася від 62 до 81 % (у середньому 72 %). Тоді як у свинячому гноі у середньому становила 70 % (від 61 до 84%) [344].

Загальні вимоги щодо якості органічних і органо-мінеральних добрив регламентуються ДСТУ 7938 [72] і ДСТУ 7881 [69]. Показники якості органічних добрив поділяють на: загальні (обов'язкові для усіх форм добрив) і спеціальні (обов'язкові для певних форм). До обов'язкових показників належать: вміст поживних речовин, гарантійний термін зберігання.

За агрегатним станом органічні добрива поділяють на тверді та рідкі. Для твердих органічних добрив важливим показником є розсипчастість. Рідкі можуть бути у вигляді розчинів і суспензій.

До загальних показників безпеки належать: ступінь небезпеки (вибухова, пожежна, токсичності); токсичність за ГДК парів або пилу добрива в повітрі робочої зони; горючість за температурою самозаймання [135].

До фізико-механічних властивостей органічних добрив відносять: наявність сторонніх механічних і/або біохімічних домішок, вологість, запах; гранулометричний склад. Механічні характеристики зазвичай відносять до технологічних властивостей добрива під час зберігання та внесення: щільність, насипна щільність і здатність утримувати вологу твердими добривами, опір течії рідких і суспендованих добрив, динамічна міцність, статистична міцність, температура кристалізації для рідких і суспендованих добрив [135].

Супутній продукт біогазового виробництва (дегестат) – це складний органо-мінеральний комплекс, органічна частина якого складається з біомаси та адсорбованих і частково окиснених речовин, а також мінеральні та органо-мінеральні сполуки. До загальних характеристик дигестату відносять: грубі, важкі та плаваючі домішки, свіжі осади, тощо. Грубі домішки утворюються внаслідок проходження через решета. Склад домішок, що затримується решетами, непостійний. Він пов'язаний з конструкціями чарунок решіт і складом дигестату. Зазвичай це домішки органічного походження. Вміст води в дигестаті з курячого посліду за нашими даними у рідкому дигестаті може бути від 85 до 95 %, а маса 1 м<sup>3</sup> в середньому становить 1020–1040 кг.

Величина рН є важливою для біохімічних процесів. Вони істотно можуть знижувати інтенсивність за зміни реакції середовища. Як показали проведені дослідження, обидва досліджувані органічні добрива – дигестат і курячий послід, мали лужний рН. Тому їх застосування не повинно підкислювати ґрунтовий розчин. Величина рН дигестатів змінювалася в незначних межах – від 8,4 до 8,7 (у курячого посліду – 7,2–7,5) (табл. 3.1).

Як видно з даних табл. 3.1, у рідкому дигестаті міститься більше елементів живлення, ніж у традиційному гноєві ВРХ на солом'яній підстилці [29]. Так, вміст азоту був вищим у два рази, а фосфору – в чотири рази. Вміст калію, залежно від партії дигестату перевищував вміст у гноєві ВРХ в 1,2–1,5 рази, проте вміст кальцію був майже в два рази меншим.

Вміст міді у відібраних зразках дигестату був 10,6–11,4 мг/кг, цинку – 25,6–34,7 і мангану 13,6–23,3 мг/кг сирової маси, тоді як у гноєві ВРХ він

відповідно становив 2,5 мг/кг, 34 і 137 мг/кг. Отже, дигестат містить підвищений вміст міді та порівняно мало мангану.

Таблиця 3.1

**Кислотність і вміст елементів живлення в рідкому дигестаті з курячого посліду**

Рік	рН	Вміст у сирій масі						
		макроелементів, %				мікроелементів, мг/кг		
		N	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	K <sub>2</sub> O	CaO	Cu	Zn	Mn
2021	8,7	0,97	1,01	0,74	0,23	10,6	25,6	23,2
2022	8,5	1,08	1,03	0,92	0,24	11,0	34,7	13,6
2023	8,4	0,98	0,87	0,77	0,31	11,4	35,4	17,2
Середнє	8,5	1,01	0,97	0,81	0,26	11,0	31,9	18,0
σ	0,1	0,12	0,31	0,13	0,14	4,1	10,3	5,1
V	3,3	19,1	34,2	14,5	0,17	11,0	43,5	47,7

Коефіцієнт варіації вмісту елементів живлення показує, що кожна нова партія дигестату потребує оцінювання хімічного складу.

Як показують розрахунки, з рідким дигестатом у ґрунт надходить велика кількість поживних речовин, які після внесення стають доступними для живлення рослин. Так, вже за дози внесення 30 т/га дигестату в ґрунт у середньому надходить 303 кг азоту, 291 кг P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, 247 кг K<sub>2</sub>O, а також 330 г Cu, 957 г Zn і 540 г Mn. Тому з агрономічного та екологічного погляду хімічний склад є найбільш важливою характеристикою супутніх продуктів біогазового виробництва. Він має важливе значення як для контролю за правильним режимом як роботи біогазових установок, так і для подальшого їх використання.

Дигестат також містить органічні речовини, що позитивно впливає на фізичні та хімічні властивості ґрунтів [419]. Як видно з даних табл. 3.2, вміст органічних речовин у різних видах дигестатів змінювався від 22,8 до 69,4 %, азоту – 9,7–18,6 %, у тому числі амонійних сполук – 1,9–7,7 %. Анаеробний

ферментований продукт є більш мінералізованим і тому містять менше органічного вуглецю (22,8 %), а отже й активного гумусу порівняно зі курячим послідом (33,4 %).

Таблиця 3.2

**Вміст води, органічних речовин і макроелементів у курячому посліді та дигестаті на його основі**

Продукт	Вологість, %	Вміст, % на суху речовину							
		органічних речовин	азоту		P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	K <sub>2</sub> O	MgO	CaO	SO <sub>3</sub>
			загального	у т. ч. N-NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>					
Курячий послід	53,6	33,4	9,2	2,4	4,2	3,7	1,9	10,5	1,0
Дигестат (сепаратор)	93,8	69,4	16,9	6,8	3,0	4,3	0,9	6,5	1,5
Дигестат (доброджувач)	93,8	67,7	18,6	7,7	3,3	9,7	2,0	8,0	1,5
Дигестат (ферментатор)	92,1	22,8	14,9	5,3	5,5	8,0	2,5	8,0	1,0
Дигестат твердий	76,3	40,9	9,7	1,9	3,0	2,4	1,5	4,3	0,8

У досліджах [344] рухомі гумінові речовини становили незначну частину органічної речовини в органічних добривах і суттєво не відрізнялися між видами органічних добрив. Вони відносять до активних форм гумусу з низьким вмістом вуглецю і більш високим вмістом азоту. Відношення «рухомі гумусові речовини : рухомі фульвокислоти» показує, що вищий індекс гуміфікованих речовин був в анаеробному дигестаті, ніж у гноєві. Це свідчить про вищий рівень гуміфікації і може мати більш позитивний вплив на ґрунт.

Відношення C : N у різних видах дигестату 0,8–2,1, а в курячому посліді 1,8. Вузьке відношення вуглецю до азоту (C : N) може призвести до швидшого розкладання органічних речовин добрив і доступності азоту для рослин. Найбільш низьке відношення C : N було виявлено в анаеробному дигестаті.

Азот є одним із основних чинників, що визначають родючість ґрунту та продуктивність сільськогосподарських культур. Встановлено, що



концентрація загального азоту та азоту амонійних сполук були вищими у дигестаті, ніж у курячому посліді, тому використання останнього може вимагати менших затрат праці та енергії через меншу кількість добрива, необхідного за однакових доз удобрення.

Амоній є найближчим резервом азоту для швидкого засвоєння кореневими системами рослин. Інша частина азоту органічних сполук буде поступово мінералізуватися. Це сприятиме пролонгованій позитивній його дії на ґрунт і рослини. Цю особливість дигестату необхідно враховувати при розробленні системи удобрення сільськогосподарських культур. Для гальмування процесів нітрифікації, що інтенсивно проходять за внесення в ґрунт азотних сполук і сприяють їх міграції у біосфері, можуть бути добавлені інгібітори нітрифікації [29].

Дигестати містили різну кількість фосфору, калію, кальцію, магнію та сірки і за цими показниками не поступалися курячому посліду. Це корисні елементи мінерального живлення, важливі для росту культур, тому дигестат можна вважати цінним комплексним удобрювальним продуктом. Відмінності в хімічному складі дигестатів можуть визначатися використанням у пташниках різних кормів, їх якістю, віком і кількістю вирощуваних курей.

Вміст інших макроелементів у біогазовій суспензії також змінюється в широких межах залежно від проходження доброджування, сепарації, ферментації, відстоювання тощо вміст фосфору ( $P_2O_5$ ) становив 3,0–5,5 %, калію ( $K_2O$ ) – 2,4–9,7, кальцію ( $CaO$ ) – 4,3–8,0, магнію ( $MgO$ ) – 0,9–2,5, сірки – 0,3–0,6 % на суху масу.

До фізико-механічних показників дигестату відносяться вологість, об'ємна маса, пластично-в'язкі властивості. Вода входить у трьох видах: вільна (60–70 %), колоїдно-зв'язана (20–30) та гігроскопічна (5–10 %). З дигестату вільна вода легко видаляється фільтрацією, віджиманням на пресах або декантацією, тому що вона не зв'язана з його твердими часточками. Важче видалити колоїдно-зв'язану воду, що ускладнює обробку дигестату. Колоїдно-зв'язану воду органічно поєднана з твердими часточками дигестату та

покриває їх гідратною оболонкою. Це не дозволяє часточкам з'єднуватись у великі агрегати. Повне видалення такої води можливе лише сушінням за високих температур. Проте вже за висушування дигестату на 40–50 %, як колоїд, він набуває властивості незворотності. Тобто, як наприклад і торф, за повторного зволоження перестає розбухати і втримувати вологу. За центрифугування від 35 до 90 % сухої речовини виноситься з фугатом.

Об'єм дигестату залежить від вмісту води і зі зменшенням вологості об'єм продукту зменшується. Його можна визначити за такою формулою:

$$O_2 = O_1(100 - B_1) : (100 - B_2),$$

де  $O_1$ ,  $O_2$  – початковий і кінцевий об'єм, м<sup>3</sup>;

$B_1$ ,  $B_2$  – початкова та кінцева вологість дигестату, %.

Ця формула дійсна лише до зниження вологості дигестату від 65 до 75 %. За подальшого висушування, вода виходить з осаду, зменшується його маса, але об'єм дигестату не змінюється. Це пояснюється пружністю твердих часточок дигестату. Подальшого зменшення його об'єму можна досягти лише термічною обробкою продукту.

Сепарацією можна розділити дигестат на тверду та рідку фракції. При цьому об'єм рідкого дигестату зменшується на 10–20 % залежно від вихідного матеріалу та технології сепарації. Тверда фракція містить до 40 % сухої речовини і економніша для транспортування. Крім того, її можна досушити і збільшити вміст сухої речовини до 90 %.

Для визначення об'ємної маси дигестату за різної вологості необхідно знати питому масу сухих речовин, яка залежно від складу дигестату може змінюватись.

Важливим показником дигестату є пластично-в'язкі властивості. Вони змінюються залежно від градієнта швидкості – за малих градієнтів в'язкість досягає більших значень, а за її збільшення – зменшується в десятки разів.

Дигестат є хорошим джерелом не лише легкодоступних макро-, але й мікроелементів для рослин і ґрунтових мікроорганізмів, тому може частково

замінити їх надходження в ґрунт з традиційними органічними або мінеральними добривами [292].

Відносно удобрювальних продуктів і пестицидів, що застосовуються в сільському господарстві України, встановлено норми і гранично допустимі концентрації важких металів. За використання дигестату на добриво, важливо контролювати їх вміст у ґрунті та регулювати надходження моніторинговими аналізами ґрунту та рослин і вчасно реагувати на будь-які відхилення від прийнятих стандартів. Постановою Кабінету Міністрів України від 15 грудня 2021 р. за № 1325 [141] затверджено нормативи ГДК небезпечних речовин у ґрунтах, тоді як граничні нормативи внесення азотних добрив залежно від ґрунтово-кліматичних умов, згідно ДСТУ 7925 [71], мають рекомендаційний характер.

Нині в Україні також відсутні нормативні документи щодо допустимого вмісту елементів живлення та шкідливих домішок у добривах, хоча у ЄС та інших країнах вони встановлені [349]. Так, в Європейському Союзі за повторного використання міських і промислових відходів дози компосту повинні бути розраховані так, щоб з ними у ґрунт щорічно надходило не більш як 25 кг/га важких металів (10 – міді, 10 – хрому, 2,15 – свинцю, 2 – нікелю, 0,35 – миш'яку, 0,40 – ртуті, 0,10 – кадмію).

У міжнародних регламентах [349] і ДСТУ 4944 [63] рекомендується контролювати вміст мінімум п'яти, а в Україні – шести важких металів. За вітчизняними нормативами якості органічних добрив, на відміну від європейських, підлягає контролю вміст фтору, проте відсутні ртуть і хром. У ДСТУ 4944 [63] ГДК металів в удобрювальних продуктах корегується залежно від фонового вмісту та ГДК їх у ґрунті і від стійкості ґрунту до забруднення за ґрунтово-кліматичними зонами (Полісся, Лісостеп, Степ). При цьому разове надходження шкідливої речовини у ґрунт з удобрювальним продуктом має бути у 10 разів меншим за ГДК.

Дигестат крім макро-, містить також і мікроелементи, які в адекватних концентраціях потрібні для вирощування рослин, але у високих концентраціях

(важкі метали) вони обумовлюють токсичну дію. Забруднення дигестату важкими металами є одним з основним чинників, що може обмежувати його тривале застосування в якості органічного добрива.

Залежно від хімічного складу курячого посліду, а також можливого добавляння мікродобрих для поліпшення та пришвидшення процесу бродіння дигестат може містити і різну кількість мікроелементів (табл. 3.3).

Таблиця 3.3

**Вміст мікроелементів у курячому посліді та дигестаті на його основі**

Продукт	Вміст, мг/кг сухої маси				
	B	Fe	Mn	Cu	Zn
Курячий послід	66,2	57,8	36,2	117,5	673,1
Дигестат (сепаратор)	251,6	639,2	3,9	277,4	1400,0
Дигестат (доброджувач)	237,1	623,2	4,8	296,8	1509,7
Дигестат (ферментатор)	206,3	495,6	5,9	251,9	1293,7
Дигестат твердий	63,7	208,4	8,7	97,0	515,2

Найбільше в перерахунку на суху масу дигестат містить бору, заліза, міді й цинку. Залежно від виду дигестату (після сепаратора, доброджувача чи ферментатора) вміст бору, порівняно з курячим послідом, підвищується в 3,1–3,8 рази, заліза – майже в десять разів, міді – в 2,1–2,5 рази і цинку – в 1,9–2,2 рази. При цьому вміст мангану знижується в 4–9 разів.

У твердому дигестаті, порівняно з курячим послідом у 3,6 рази підвищується вміст заліза, але знижується вміст мангану, міді та цинку – відповідно в 4,2, 1,2 та в 1,3 рази.

Отже, для ефективного застосування як удобрювального продукту та запобігання забруднення довкілля потрібно проводити хімічний аналіз кожної партії супутніх продуктів, особливо за внесення певних змін у технологію виробництва біогазу та наступної їх доробки і зберігання.

До органолептичних показників дигестату можна віднести забарвлення, запах, прозорість. Запах пояснюється наявністю в біогазовій суспензії летких речовин. У екскрементах курей різних груп також ймовірна наявність хімічних забруднювачів – антибіотики, регулятори росту, дезінфектанти та ін.

З часом (12–17 міс.), у процесі зберігання посліду, антибіотики розкладаються під дією зовнішніх чинників і мікроорганізмів. Однак, наявність одночасно антибіотиків тетрациклінової, пеніцилінової і поліміксинової груп у різних концентраціях і поєднаннях збільшує термін розкладання органічних сполук і сприяє накопиченню окремих антибіотиків мікробного походження в продукті за зберігання в умовах мезофільного режиму до понад 1,5 року. Це вказує, що на тлі пригнічення більшості видів кишкової патогенної та умовно патогенної, а також до симбіотичної мікрофлори, гриби (зокрема представники роду *Penicillium*, у тому числі *Penicillium chrysogenum*), які належить до ґрунтової мікрофлори, здатні продовжувати свою життєдіяльність на посліді курей [56]. Також, у складі добрива можуть міститися дезінфікувальні засоби, які використовують для миття обладнання, санації приміщень тощо. Ці хімічні речовини, залежно від кількості їх надходження з удобрювальним продуктом у ґрунт, можуть мати токсичний вплив на рослини [135].

Дослідженнями встановлено, що курячий послід має рН 7,2–7,5 і високу мікробіологічну активність, яка ймовірно проявляється і в дигестаті (табл. 3.4).

Мікробіологічним аналізом курячого посліду не було виявлено бактерій групи кишкової палички, сульфїтредукувальних анаеробів (*Clostridium perfringens*) та ентерококів.

Органічна речовина дигестату є поживним субстратом для мікроорганізмів, збільшує їх кількість і таким чином сприяє підвищенню вмісту органічних речовин у ґрунті [310]. Це створює сприятливі умови для функціонування мікроорганізмів і підтримує ґрунт у пухкому стані. Дигестат є відмінним органічним рідким добривом, яке за тривалого застосування може поліпшити фізичні та хімічні властивості ґрунту, підтримує його структуру [303].

Важливим показником біологічної активності ґрунту та його родючості є активність ґрунтових мікробних ферментів, яка зазвичай походить від ексудатів коренів рослин і ґрунтових мікроорганізмів.

**Показники загальної мікробіологічної активності курячого посліду**

Показник / група мікроорганізмів	КУО в 1 г сирого субстрату
Кількість бактерій на ПА (мікроорганізми, які використовують органічні форми азоту), амоніфікувальна мікрофлора	$0,8 \times 10^9$ (підвищена амоніфікувальна активність)
Кількість бактерій на КАА (які розкладають безазотисті органічні речовини ґрунту із групи олігосахаридів і споживають мінеральні форми азоту), амілолітична мікрофлора	$0,18 \times 10^9$ (середня амілолітична активність (розщеплення крохмалю з утворенням ахроодекстринів, зони розщеплення 0,1 см)
Коефіцієнт мінералізації	0,125
Азотфіксувальні мікроорганізми, олігонітрофільна мікрофлора (проведення несимбіотичної азотфіксації)	$0,28 \times 10^2$
Мікроскопічні гриби, бактерії, які вимогливі до поживного середовища	$1,48 \times 10^7$
Денітрифікувальні бактерії	Не виявлено
Мікроорганізми, здатні до мобілізації фосфору з неорганічних сполук (метод Муромцева)	$0,48 \times 10^3$
Мікроорганізми, здатні до мобілізації фосфору з органічних сполук (метод Менкіної)	$2,48 \times 10^7$
Целюлозоруйнівні аеробні мікроорганізми, які задіяні в розкладанні безазотистих речовин із групи полісахаридів і целюлози, целюлолітична мікрофлора	$0,38 \times 10^5$

Активність ґрунтових ферментів відображає інтенсивність трансформації поживних речовин у ґрунті. На неї впливають поживні речовини ґрунту, мікроорганізми та інші чинники ґрунтового середовища. Вважається, що за активністю ферментів можна прогнозувати родючість ґрунту та впливати на неї поліпшенням ґрунтових умов. Метаболічні процеси ґрунтової мікрофлори після внесення рідкого гною стимулюються більше, ніж після застосування мінеральних обрив. Підвищується целюлозолітична активність ґрунту, пришвидшуються біологічні процеси, підвищується чисельність

мікроорганізмів, а в результаті цього і величина ґрунтової біомаси. Мінеральні ж добрива за тривалого застосування гальмують життєдіяльність ґрунтової мікрофлори й інтенсивність біохімічних процесів у ґрунті [188].

Встановлено, що застосування дигестату під пшеницю озиму підвищує активність ґрунтової уреазы, але знижує – дегідрогенази [374]. Показано [387], що підживлення пшениці біогазовою суспензією може підвищити активність ґрунтової каталази, лужної фосфатази та уреазы. На тлі дигестату збільшується кількість та індекс різноманітності ґрунтових мікроорганізмів [291]. Корисна мікрофлора ґрунту створює сприятливі умови для росту та розвитку рослин і створює ефективний бар'єр для популяцій патогенів [385]. Дигестат є джерелом високоякісної органічної речовини і різних фізіологічно активних речовин гумусу, що забезпечує оптимальне відношення C : N для росту мікроорганізмів і сприяє їх функціонуванню [411].

Мікобіота в ґрунті знаходяться, як у вигляді спор, так і у стані міцелію, який активно росте [209]. Мікологічним аналізом ґрунту з різних варіантів досліджу було виявлено розвиток грибів з таких родів: *Fusarium*, *Pythium*, *Penicillium*, *Aspergillus*, *Trichoderma*, *Cladosporium*, *Gliocladium*, *Epicoccum*, *Zygomycetes*, *Rhizoglyphus*, *Acremonium*, *Wardomyces* (табл. 3.5, рис. 3.1).

Як видно з даних табл. 3.5, найчастіше виявляли розвиток грибів роду *Penicillium*. Їх частка варіювала від 51,3 % у зразка ґрунту з внесенням 20 т/га дигестату до 65,8 % у зразка, де було внесено 50 т/га дигестату.

Виявлено широкий спектр фітопатогенних грибів: *Aspergillus*, *Botryosphaeria*, *Fusarium*, *Penicillium*, *Alternaria*, *Bipolaris*, *Pythium* – збудники корневих гнилей зернових культур (гнилі та опіки проростків, кореневі гнилі, гниль основи стебла, гниль міжвузля, надлом стебла та інше). Слід звернути увагу на такі патогенні роди грибів як *Fusarium* та *Pythium*, навіть незначна їх кількість за сприятливих умов може викликати загнивання кореневої системи рослин, судинне ураження.

Дослідженнями також було виявлено умовно патогенні гриби з родів *Cladosporium*, *Epicoccum* і гриби класу *Zygomycetes*, які зазвичай ведуть

сапрофітний спосіб живлення, але можуть виступати як факультативні паразити.

Таблиця 3.5

**Мікологічний стан ґрунту за внесення аміаку водного й дигестату  
(27.03.2022 р.)**

Мікобіота	Варіант досліджу									
	N <sub>ва110</sub>		Дигестат, т/га							
			20		30		40		50	
	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2
<i>Fusarium roseum</i>	5,0	15,5	3,6	11,7	3,6	12,0	2,3	7,5	—	—
<i>F. solani</i>	3,4	10,5	4,3	14,0	3,1	10,3	0,7	2,3	2,5	8,4
<i>F. oxysporum</i>	0,3	0,9	0,3	1,0	0,3	1,0	0,3	1,0	0,3	1,0
<i>Pythium</i> ssp.	2,8	8,7	3,3	10,1	3,0	10,0	2,6	8,5	2,6	8,7
<i>Penicillium</i> ssp.	17,7	54,8	15,8	51,3	16,7	55,7	18,9	61,6	19,6	65,8
<i>Aspergillus</i> ssp.	2,0	6,2	1,5	4,9	1,5	5,0	1,8	5,9	1,2	4,0
<i>Trichoderma</i> ssp.	0,4	12,4	0,7	2,3	0,8	2,7	2,5	8,1	2,5	8,4
<i>Cladosporium</i> ssp.	0,3	0,9	0,2	6,5	0,1	0,3	—	—	—	—
<i>Gliocladium</i> ssp.	0,1	0,3	0,3	1,0	0,4	1,3	0,6	2,0	0,8	2,7
<i>Epicoccum</i> ssp.	—	—	0,1	0,3	0,1	0,3	—	—	0,1	0,3
<i>Zygomycetes</i> ssp.	—	—	0,2	0,6	—	—	0,1	0,3	—	—
<i>Paecilomyces</i> ssp.	—	—	0,1	0,3	0,3	1,0	0,2	0,7	0,2	0,7
<i>Acremonium</i> ssp.	0,3	0,9	0,4	1,3	—	—	0,5	1,6	—	—
<i>Wardomyces</i> ssp.	—	—	—	—	0,1	1,0	0,2	0,7	—	—
Всього	32,3		30,8		30,0		30,7		29,8	

*Примітка.* 1 – середня кількість колоній у чашці, шт; 2 – частота повторюваності, %.

Отже, з розвитком біогазового виробництва збільшується і виробництво різних видів дигестатів, які можна використати у сільському господарстві як органічні добривальні продукти, але їх біохімічний склад, властивості нині вивчені недостатньо.





Рис. 3.1 Чашки Петрі з колоніями грибів (за розведення ґрунтової суспензії 1 : 1000)

Різновекторна дія органічних добрив зумовлена властивостями ґрунтів, на яких вони застосовуються, загальним рівнем одержаних урожаїв, рівнем застосування мінеральних добрив і особливості технології вирощування окремих сільськогосподарських культур.

Мінеральні та органічні добрива впливають на рослини і формування врожаю, головним чином, азотом, фосфором і калієм, що містяться в них. Посередній же вплив їх органічної речовини (через поліпшення фізико-хімічних, фізичних та інших властивостей ґрунту) на більшості ґрунтів, очевидно, не проявляється або проявляється слабо. На еродованих, а також на невапнованих ґрунтах з кислою реакцією середовища (особливо легкого гранулометричного складу) позитивна дія органічних добрив іноді може бути істотною [38, 102]. Мікроорганізми органічних добрив беруть активну участь у формуванні ґрунту і створенні його родючості. Вони можуть впливати на ґрунт і внесені в нього добрива безпосереднім контактом з ними і завдяки екзосмосу ферментів, яким властива висока біохімічна активність. Наприклад, встановлено наявність у гною тіаміну, біотину, ауксину та інших подібних речовин, що позитивно впливають на життєдіяльність рослин і корисної мікрофлори ґрунту. Це пояснюється вмістом в органічних добривах не тільки поживних речовин, але й вітамінів, ауксинів і антибіотичних органічних сполук [15]. Вітаміни і ауксини синтезуються мікроорганізмами під час зберігання органічних добрив, а також у ґрунті, а потім надходять у рослини, впливають на обмін речовин і сприяють підвищенню врожаю.

Проте, згідно огляду літературних джерел [102], зроблено висновок, що не слід фетишизувати мікробіологічну діяльність ґрунту, якщо можна підвищити урожай ефективнішими і, мабуть, доступнішими способами. У свою чергу добрива також впливають на активність ґрунту. Однак мікроорганізми гною належать до термофільних форм, які в ґрунті зразу ж гинуть і тому не можуть впливати на його родючість. Тому для формування врожаю порівняно більше значення має вміст поживних речовин, ніж наявність

у ньому вітамінів і стимуляторів росту. Позитивний вплив останніх на врожай культур у польових умовах не можна вважати доведеним [102].

### **3.2 Склад і порівняльна характеристика різних органічних добрив**

Органічні добрива, що безпосередньо не виробляються в господарстві, поряд з мінеральними добривами є додатковим джерелом надходження поживних речовин у ґрунт і поліпшення їх балансу.

Встановлено, що за вмістом поживних речовин дигестат з курячого посліду значно переважав напівперепрілий гній ВРХ на солом'яній підстилці (табл. 3.5). Особливо це стосується вмісту фосфору й азоту. Тому добриво може бути цінним для поліпшення в першу чергу фосфатного режиму ґрунтів.

Як видно з даних табл. 3.5, дигестат містить багато води, що ускладнює його транспортування на великі відстані. З урахуванням зміни вологості добрив у широкому діапазоні, під час розрахунку дози елементів живлення необхідно робити поправу на цей показник.

Порівняно з такими видами органічних добрив, що мають також вологість 81–98 % (пташиний послід свіжий, пташиний послід напіврідкий, гній напіврідкий ВРХ, сапропель, гноївка свиней, фекалії, гній свиней рідкий), дигестат містить у кілька разів більше азоту (за виключенням пташиного посліду). Вміст фосфору в дигестаті з курячого посліду такий як у твердій фракції гною свиней і майже у чотири рази вищий, ніж у підстилковому гноєві ВРХ.

За вмістом калію дигестат з курячого посліду поступається лише пташиному посліду, а також подрібненому стебелинню кукурудзи і соняшнику.

Отже, порівняно з традиційними видами органічних добрив, дигестат з пташиного посліду може бути цінним удобрювальним продуктом місцевого значення для поліпшення балансу в ґрунті основних елементів живлення.

Таблиця 3.5

**Середній вміст води й основних елементів живлення в  
органічних добривах**

Вид органічного добрива	Вологість, %	Вміст елементу живлення, кг/т		
		N	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	K <sub>2</sub> O
Дигестат з курячого посліду	92	10,1	9,7	8,1
Гній підстилковий ВРХ	75	5,0	2,5	6,0
Гній напіврідкий ВРХ	85	3,0	1,2	3,3
Сеча	—	2,4	—	5,4
Гноївка свиней	88	6,1	3,4	2,3
Фекалії	93	3,5	1,6	1,4
Гній рідкий ВРХ	95	3,7	1,7	2,3
Гній свиней (тверда фракція)	11	20,2	9,6	3,0
Гній свиней рідкий	98	2,2	2,0	0,7
Пташиний послід сухий	7	17,4	30,5	12,5
Пташиний послід свіжий	81	9,1	12,4	5,3
Пташиний послід напіврідкий	85	9,0	9,0	3,0
Стоки пташиного посліду	98	1,2	2,0	0,6
Пташиний послід тривалого зберігання	27	24,5	53,9	18,7
Пташиний послід на тирсі	23	20,5	18,0	8,0
Пташиний послід на соломі	32	23,8	18,1	9,7
Осад стічних вод тривалого зберігання	63	30,0	16,0	2,0
Компост торфо-гнойовий	70	5,6	2,2	4,7
Компост торфо-послідний	70	8,3	7,4	4,1
Сапропель	85	4,2	0,7	0,1
Зелене добриво	75	5,0	1,1	3,5
Солома зернових	14	4,3	0,9	7,9
Солома бобових	18	7,1	5,3	2,0
Солома зернобобових	14	12,9	1,6	10,7
Подрібнене стебелиння кукурудзи	14	4,6	1,6	12,6
Подрібнене стебелиння соняшнику	14	8,7	3,1	28,0

*Примітка.* Власні дані та узагальнені з джерел літератури [29, 16].

## Висновки до розділу 3

1. Оскільки кількість біогазових електростанцій зростає, а супутніх продуктів виробництва енергії постійно збільшується, біохімічний склад цих добрив не було повністю досліджено. Крім того, значення мають і технології використання різної сировини для виробництва біогазу та дигестату. Це важливо враховувати для встановлення дози і часу внесення дигестату, щоб збільшити його переваги і мінімізувати потенційний вплив на довкілля.

2. Запропоновані складові характеристики дигестатів дозволяють детальніше класифікувати їх за різними ознаками, такими як: загальні, фізико-механічні, органолептичні, хімічні, теплофізичні, санітарно-бактеріологічні тощо.

3. Дигестат має високий вміст макро- та мікроелементів у розрахунку на суху речовину і може бути цінним удобрювальним продуктом, з урахуванням того, що його потрібно утилізували на незначній відстані від біогазової установки. При цьому кожен окремий дигестат – це окреме добриво, що має свій унікальний макро- й мікроелементний склад і вміст органічних речовин. Він потребує попереднього аналізу в агрохімічних лабораторіях. І вже на основі отриманих результатів і проведених розрахунків можна визначити допустимі дози внесення під певну сільськогосподарську культуру.

4. Нині немає жодних обмежень щодо реалізації дигестату як удобрювального продукту органічного походження. Тому необхідно продовжити дослідження щодо максимальних доз його внесення, ефективності під різні сільськогосподарські культури.

Основні положення цього розділу викладені в таких наукових працях автора зі списку використаних джерел [43, 177, 181–183].



## РОЗДІЛ 4

### ФОРМУВАННЯ ПРОДУКТИВНОСТІ ПШЕНИЦІ ОЗИМОЇ ЗАЛЕЖНО ВІД СИСТЕМИ УДОБРЕННЯ

Оптимальний ріст і розвиток рослин залежить від багатьох кліматичних чинників (світловий, тепловий, водний, атмосферний режими), забезпеченості поживними речовинами, а також від структури і кислотності ґрунтів, вмісту в них гумусу, поживних речовин та інших властивостей. Всі ґрунти мають певний запас поживних речовин, але більша їх частина знаходиться в малодоступній формі, або втрачається, наприклад, у результаті процесів промивання нітратів і звітрювання аміаку. Тому для оптимізації живлення рослин у ґрунт вносять необхідну кількість удобрювальних продуктів.

Високі та сталі врожаї є важливими у системах виробництва пшениці та набувають все більшого значення для агрономів. На врожайність і якість пшениці впливає низка чинників, що включають технології вирощування, ґрунтові та кліматичні умови, сівозміну або вибір сорту [132, 381]. Надходження поживних речовин є критичним чинником для підвищення та стабілізації урожайності пшениці [31]. Крім того, було встановлено [392], що низький рівень доступності азоту в ґрунті збільшує біомасу коренів. Морфологія та фізіологія кореневої системи тісно пов'язана з ростом і розвитком надземної частини рослин, які залежить від наявності в ґрунті поживних речовин.

Нині у складі рослин знайдено більше ніж 70 хімічних елементів. Проте для нормального їх росту й розвитку необхідні лише 15: С, О, Н, N, Р, К, Са, Mg, S, В, Fe, Mn, Cu, Мо, Zn. Кожний з цих елементів виконує в рослинах свою специфічну роль і не може бути замінений іншим [28]. Органічні добрива здатні забезпечувати від 30 до 50 % потреб рослин у необхідних елементах живлення. Проте за останні десятиріччя, унаслідок катастрофічного зменшення поголів'я тварин в Україні, внесення їх зменшилось до 0,5–1,0

т/га [14]. Встановлено, що часткова заміна хімічних добрив органічними добавками підвищила продуктивність і рентабельність пшениці озимої за умов обмеженого та гарантованого режиму зрошення [293].

Застосування дигестату на добриво показало вищу ефективність порівняно з традиційними удобрювальними продуктами. Наприклад, в Англії дигестат з харчових відходів і гній із соломою забезпечували підвищення врожайності озимих зернових культур на 10 %, тоді як сидерат – на 7, змішаний компост (із зеленої маси і харчових відходів) – на 8 і гноївка – на 9 %. В іншому досліді внесення 30 м<sup>3</sup>/га дигестату, з вмістом 0,36 % азоту, 0,17 – P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> і 0,44 % K<sub>2</sub>O, дало змогу заощадити 109 євро/га на застосуванні мінеральних добрив [191].

У польовому досліді, проведеному в Литві, дигестат свинячого гною та аміачну селітру під пшеницю озиму вносили двічі: 90 кг/га азоту на першому етапі на початку вегетації рослин після зими і 80 кг/га – на другому етапі, під час прощупування другого вузла на стеблі [207]. Достатнє надходження поживних речовин, особливо азоту, сприяло більш здоровому росту рослин, поліпшувало формування зерна та підвищувало вміст у ньому поживних речовин. Це сприяло збільшенню маси 1000 зерен, яка впливала на якість і кількість урожаю пшениці. Це пояснює однаковий вплив на формування врожаю пшениці, як дигестату свинячого гною або мінеральних добрив.

Дослідженнями в Англії порівнювали вплив дигестату та мінеральних добрив у дозі N<sub>250</sub> на врожайність пшениці озимої. Не було виявлено суттєвих відмінностей у врожайності біомаси та зерна між варіантами застосування дигестату (відповідно 19,2 т/га та 11,3 т/га) та мінеральних добрив (відповідно 19,6 т/га та 11,6 т/га). При цьому вміст білка в зерні відповідно становив 11,52 % та 11,06 % [382]. В інших дослідженнях, за використання добрив на основі дигестату, в зерні пшениці був вищий вміст білка, але суттєвих відмінностей у вмісті крохмалю не виявлено порівняно з варіантом з мінеральним добривом [355].

В умовах Латвії на ґрунті типу Luvisols (за класифікацією FAO) важкого пілувато-піщано-глинистого гранулометричного складу пшеницю озиму удобрювали дигестатом з гною ВРХ і деревною золою у різних поєднаннях. Доза змішаного добрива становила 5, 10 і 20 т/га. Встановлено, що використовуючи суміші дигестату та деревної золи, можна отримати достатньо високі та якісні врожаї пшениці озимої без використання мінеральних добрив. При цьому значно вищий вміст білка та клейковини, а також індекс Зелені, забезпечувала суміш добрив дигестат + зола 3 : 1 + азотне синтетичне добриво, незалежно від дози добрив [197].

За даними [132], поєднане застосування мінерального та органічного азоту для удобрення рослин може збільшити урожайність пшениці озимої і поліпшити якість зерна. У дослідях [391] заміна 50 % азоту карбаміду гноєм ВРХ із дозою внесення 180 кг/га азоту підвищує продуктивність пшениці озимої і сприяє ефективному використанню ресурсів, підвищенню економічної ефективності та зменшує вплив на довкілля порівняно з одноразовим внесенням азотних добрив. Однією з причин цього є зменшення викидів  $N_2O$ .

Значний вплив на якісні та кількісні характеристики зерна пшениці озимої мають технологічні й кліматичні чинники. З усіх елементів живлення азот має найбільше значення для накопичення білка в зерні пшениці, який вважається одним із основних чинників формування якості хліба. Хоча збільшення збору білка із зерном пов'язане з внесенням азоту значно менше (12,2 %), порівняно з урожайністю зерна (43,1 %), це також важливо для формування стратегії застосування азотних добрив [394]. Збільшення вмісту білка в зерні пов'язане з оптимальним азотним живленням завдяки багаторазовим удобренням, формою і строком внесення азотних добрив. Крім того, вплив удобрення на вміст білка в зерні змінюється залежно від особливостей сорту (період вегетації, білковий склад), агрохімічних властивостей ґрунту (вміст органічної речовини, структура, рН тощо) та метеорологічних умов (опаді, температура), умови досягання зерна [132].



Якість зерна пшениці визначається такими показниками, як вміст білка, текстура ендосперму (твердість зерна) та якість клейковини [208]. Важливими чинниками формування якісних показників зерна пшениці озимої – вмісту протеїну та вмісту клейковини є погодні умови і живлення азотом, а на загальну врожайність значний вплив має азотний режим ґрунту [275]. З іншого боку, застосування азотних добрив певною мірою підвищує стійкість рослин і зменшує негативний вплив посухи на формування врожаю пшениці [257]. Порівняно з мінеральними добривами, дигестат зі свинячого гною істотно не впливав на якість зерна пшениці озимої [243].

Основне підживлення пшениці озимої в умовах Литви рідкими органічними добривами різного походження можуть забезпечити рослини азотом як на ранніх, так і на пізніх стадіях росту. Рідкі органічні добрива дають вищі або такі ж урожаї зерна, як і сипучі мінеральні азотні добрива. Рідкі органічні різного походження та сипучі мінеральні азотні добрива, що використовуються для основного підживлення пшениці озимої рівноцінні за формуванням якості зерна та його технологічними властивостями [344].

Застосування дигестату сприяло підвищенню продуктивності пшениці озимою завдяки кращому кущінню [310]. При цьому збільшувалась біомаса рослин і накопичення сухої речовини, посилювалася їх фотосинтетична здатність. Урожайність пшениці була достовірно вищою, ніж у контрольному варіанті, а оптимальна доза заміни мінеральних добрив дигестатом становила 60–75 м<sup>3</sup>/га.

Однією з основних проблем, яка обмежує темпи зростання виробництва пшениці за органічних систем землеробства є низька продуктивність порівняно з інтенсивними технологіями [292]. Проте в умовах посухи такі системи можуть стати реальною альтернативою [238]. Це актуально для степової зони України й не менш важливо для регіонів недостатнього зволоження Лісостепу, де нерівномірне розподілення опадів і висока ймовірність посухи під час формування врожаю. В органічному виробництві на врожайність пшениці озимої найбільше впливають погодні умови і її

зменшення може сягати 42 %, хоча порівняно з іншими культурами вона дає стабільніші врожаї [ 204].

Отже, необхідно досліджувати вплив внесення дигестату й промислових добрив та їх поєднань на властивості ґрунту в різних природних умовах, а також їх вплив на формування врожаю пшениці озимої і визначити оптимальну дозу дигестату в Правобережному Лісостепу, щоб обґрунтувати умови ефективного і безпечного його застосування для поліпшення ґрунту.

#### **4.1 Вплив високих доз дигестату на формування продуктивності пшениці озимої**

Метою проведеного польового дослідження було вивчення можливості застосування зростаючих доз дигестату у вигляді органічного удобрювального продукту для підживлення пшениці м'якої озимої наповесні, його впливу на формування врожаю і якості зерна та ураження його патогенами.

Встановлено, що внесення дигестату в дозах від 30 до 100 м<sup>3</sup>/га у вигляді ранньовесняного підживлення впливало на формування врожаю пшениці озимої (табл. 4.1).

Таблиця 4.1

##### **Урожайність пшениці озимої залежно від ранньовесняного підживлення різними дози дигестату, 2021 р.**

Варіант дослідження	Урожайність, т/га	Приріст/зниження урожайності до контролю	
		т/га	%
Без підживлення (контроль)	5,22	—	—
Азотні добрива (N <sub>109</sub> )	7,56	2,34	45
Дигестат 30 м <sup>3</sup> /га	6,00	0,78	15
Дигестат 50 м <sup>3</sup> /га	5,04	−0,18	− 3
Дигестат 70 м <sup>3</sup> /га	5,10	− 0,12	− 2
Дигестат 100 м <sup>3</sup> /га	4,84	− 0,38	− 7
<i>НІР<sub>05</sub></i>	0,31		

Порівняно з контролем (без підживлення) азотні добрива в дозі 109 кг/га д. р. і дигестат у дозі 30 м<sup>3</sup>/га сприяли достовірному підвищенню врожайності пшениці озимої – відповідно на 3,34 і 0,78 т/га або на 45 і 15 %. Внесення дигестату в дозі 50–70 м<sup>3</sup>/га достовірно не змінювало врожайність зерна порівняно з контролем, тоді як внесення в дозі 100 м<sup>3</sup>/га істотно її знижувало – на 0,38 т/га або на 7 %.

Внесення дигестату навіть у дозі 30 м<sup>3</sup>/га було менш ефективним порівняно з підживленнями азотними добривами – зниження врожайності зерна становило 1,56 т/га або на 21 %.

Основною причиною зниження врожайності зерна за внесення дигестату є вилягання посівів у фазу колосіння, що було спричинено механічним пережиманням судинно-волокнистих пучків (рис. 4.1). Як встановлено, це погіршувало налив зерна та знижувало його масу.

Довжина першого міжвузля пшениці озимої збільшується за внесення добрив і залежить від їх доз. Найменший його приріст, а також кращу стійкість до вилягання давало поєднане внесення азоту мінеральних добрив і дигестату у відношенні 1 : 1 [419]. Крім того, на ділянках досліду, де вносилися дигестат спостерігалось поширення хвороб листків і колоса, зокрема піренофорозу, борошнистої роси, фузаріозу, кладоспоріозу та альтернаріозу (табл. 4.2).

Ступінь ураження хворобами залежав від дози внесення рідкого дигестату – чим була вища доза, тим вищий ступінь ураження. Це спричиняло зменшення площі фотосинтетичної поверхні рослин та їх інтоксикацію продуктами життєдіяльності збудників хвороб.

Основною причиною вилягання посівів пшениці озимої на дослідних ділянках із внесенням дигестату та поширення на них хвороб є велика доза азоту мінеральних сполук, який сприяє інтенсивному наростанню вегетативної маси рослин з великими паренхімними клітинами. Внаслідок цього формуються високі, нестійкі до хвороб рослини [152] (див. рис. 4.1).



30 м³/га



50 м³/га



70 м³/га



100 м³/га

Рис. 4.1 Стан посівів пшениці озимої 02.07.2021 року за різних доз внесення дигестату

**Ураження хворобами пшениці озимої залежно від ранньовесняного підживлення різними дози дигестату, 2021 р.**

Варіант досліджу	Хвороба				
	Піренофороз (Pyrenophora tritici-repentis)	Борошниста роса (Erysiphe graminis)	Фузаріоз (Fusarium)	Кладоспоріоз (Fulvia fulva)	Альтернаріоз (Alternaria tenuis Fr.)
Без підживлення (контроль)	7	8	7	7	6
Азотні добрива (N <sub>109</sub> )	6	7	7	7	6
Дигестат 30 м <sup>3</sup> /га	6	7	6	7	6
Дигестат 50 м <sup>3</sup> /га	5	6	5	6	5
Дигестат 70 м <sup>3</sup> /га	5	6	4	6	5
Дигестат 100 м <sup>3</sup> /га	4	6	3	5	4
<i>HIP</i> <sub>05</sub>	1	1	1	1	1

*Примітка.* Стійкість рослин проти хвороб визначали за такою шкалою: 9 – дуже висока стійкість (відсутність ознак хвороби); 8 – висока стійкість (інтенсивність ураження органів рослин до 5 %); 7 – стійкість (інтенсивність ураження 5–10 %); 6 – стійкість (інтенсивність ураження 10–15 %); 5 – слабка сприйнятливність, гетерогенність (інтенсивність ураження 15–25 %); 4 – сприйнятливність (інтенсивність ураження 25–40 %); 3 – сприйнятливність (інтенсивність ураження 40–65 %); 2 – висока сприйнятливність (інтенсивність ураження 65–90 %); 1 – дуже висока сприйнятливність (інтенсивність ураження 90–100 %).

Аналогічні дані були одержані і в дослідженнях [419], де на тлі дигестату рослини були вищими, ніж при застосуванні мінеральних добрив. Збільшенням висоти рослин спостерігалось до частки дигестату в системі удобрення 50 %, де вони були найвищими – 80 см, а далі знижувалися. Такий підхід до удобрення може не тільки запобігти вилягання, але й дозволить рослинам пшениці озимої отримати відповідну площу живлення, надати необхідні для росту та розвитку елементи живлення і більше сприятиме формуванню високого врожаю.

У формуванні врожаю важливе значення має поживний режим ґрунту. На концентрацію азоту та інших макроелементів у верхньому шарі ґрунту можна впливати внесенням як органічних, так і мінеральних добрив. Органічні добрива, наприклад, мають як прямий, так і непрямий вплив на ґрунт. Безпосередньо вони сприяють доступності поживних речовин через поступове вивільнення поживних речовин після мінералізації органічних сполук. Побічно вони покращують структуру ґрунту, що може додатково підвищити доступність поживних речовин [273].

Регулювання азотного живлення сільськогосподарських культур є основною й найактуальнішою проблемою сучасної агрохімічної науки. Нестача азоту, як і його надлишок не дозволяє отримати потенційний рівень їх продуктивності. До того ж надлишок азоту може спричинити порушення екологічного балансу в землеробстві. Внесення необґрунтовано високих доз азоту удобрювальних продуктів зменшує їх ефективність. Тому бажано, щоб він поповнював тільки ту частину винесеного врожаю, яка не забезпечується мобілізацією азоту з ґрунтових запасів [165].

На думку вчених [30, 166], повернення винесеного азоту врожаєм повинно бути у межах 90–100 %. Надмірне накопичення азоту мінеральних сполук у ґрунті зумовлює непродуктивні його витрати в атмосферу і ґрунтові води, а також небезпечне забруднення нітратами довкілля та сільськогосподарської продукції.

Як видно з даних табл. 4.3, внесення азотних мінеральних добрив і дигестату сприяє підвищенню вмісту в ґрунті як нітратної, так і амонійної форм азоту.

У фазу початку відновлення весняної вегетації пшениці озимої за низьких температур ґрунту й достатньої кількості вологи процеси нітрифікації гальмувалися, що призводило до повільного утворення нітратів, тому в цей період в ґрунті переважав азот амонійних сполук. Так, у контрольному варіанті досліді без підживлень у шарах ґрунту 0–20 і 20–40 см вміст азоту амонійних сполук був відповідно 16,2 і 13,2 мг/кг.

Таблиця 4.3

**Динаміка вмісту азоту мінеральних сполук у ґрунті під пшеницею  
озимою залежно від ранньовесняного підживлення різними дози  
дигестату (2021 р.), мг/кг**

Варіант досліджу	Шар ґрунту, см				
	0–20	20–40	40–60	60–80	80–100
1	2	3	4	5	6
Стадія ВВСН 23–25					
Без підживлення (контроль)	<u>9,1*</u> 16,2	<u>8,2</u> 13,2	<u>7,4</u> 11,0	<u>6,6</u> 10,5	<u>5,8</u> 9,1
Азотні добрива (N <sub>109</sub> )	<u>10,5</u> 18,3	<u>9,5</u> 14,2	<u>8,9</u> 12,4	<u>7,8</u> 11,6	<u>7,2</u> 9,5
Дигестат 30 м <sup>3</sup> /га	<u>12,8</u> 22,0	<u>9,7</u> 18,7	<u>8,7</u> 12,2	<u>8,8</u> 11,4	<u>7,4</u> 9,8
Дигестат 50 м <sup>3</sup> /га	<u>15,8</u> 23,3	<u>10,8</u> 19,9	<u>9,5</u> 12,8	<u>9,4</u> 11,9	<u>8,1</u> 9,8
Дигестат 70 м <sup>3</sup> /га	<u>19,2</u> 24,3	<u>11,8</u> 20,7	<u>10,8</u> 12,7	<u>9,8</u> 11,2	<u>9,0</u> 9,2
Дигестат 100 м <sup>3</sup> /га	<u>20,8</u> 28,9	<u>12,6</u> 23,7	<u>11,4</u> 12,6	<u>10,7</u> 11,7	<u>9,4</u> 9,8
<i>HIP</i> <sub>05</sub>	<u>0,7</u> 1,2	<u>0,5</u> 0,9	<u>0,5</u> 0,7	<u>0,4</u> 0,7	<u>0,4</u> 0,5
Стадія ВВСН 30–32					
Без підживлення (контроль)	<u>12,0</u> 18,5	<u>9,8</u> 14,2	<u>8,8</u> 12,4	<u>7,4</u> 11,3	<u>6,6</u> 9,4
Азотні добрива (N <sub>109</sub> )	<u>16,8</u> 26,0	<u>13,2</u> 16,7	<u>9,0</u> 12,4	<u>7,8</u> 11,4	<u>7,1</u> 9,8
Дигестат 30 м <sup>3</sup> /га	<u>19,5</u> 30,4	<u>14,8</u> 19,8	<u>9,1</u> 12,5	<u>7,8</u> 11,9	<u>7,1</u> 9,9
Дигестат 50 м <sup>3</sup> /га	<u>24,2</u> 36,6	<u>15,4</u> 19,9	<u>10,6</u> 12,8	<u>8,2</u> 11,7	<u>7,4</u> 9,4
Дигестат 70 м <sup>3</sup> /га	<u>26,5</u> 38,8	<u>16,8</u> 20,4	<u>10,7</u> 12,8	<u>8,6</u> 11,8	<u>7,5</u> 9,1
Дигестат 100 м <sup>3</sup> /га	<u>29,0</u> 40,1	<u>17,9</u> 21,0	<u>11,2</u> 12,9	<u>8,9</u> 11,6	<u>7,8</u> 9,2
<i>HIP</i> <sub>05</sub>	<u>0,9</u> 1,8	<u>0,7</u> 0,9	<u>0,6</u> 0,7	<u>0,5</u> 0,6	<u>0,5</u> 0,5



Продовження таблиця 4.3

1	2	3	4	5	6
Стадія ВВСН 55–57					
Без підживлення (контроль)	<u>7,9</u> 15,7	<u>8,7</u> 12,4	<u>7,6</u> 9,7	<u>6,6</u> 9,1	<u>5,9</u> 7,6
Азотні добрива (N <sub>109</sub> )	<u>8,9</u> 21,4	<u>10,9</u> 13,6	<u>7,8</u> 10,3	<u>6,6</u> 9,2	<u>5,7</u> 7,8
Дигестат 30 м <sup>3</sup> /га	<u>9,9</u> 25,3	<u>10,5</u> 14,6	<u>7,7</u> 10,9	<u>6,6</u> 9,1	<u>5,5</u> 7,7
Дигестат 50 м <sup>3</sup> /га	<u>11,7</u> 27,0	<u>11,8</u> 15,7	<u>7,5</u> 11,3	<u>6,4</u> 9,2	<u>5,6</u> 7,6
Дигестат 70 м <sup>3</sup> /га	<u>12,9</u> 30,7	<u>12,5</u> 16,9	<u>7,7</u> 10,9	<u>6,7</u> 8,9	<u>5,7</u> 7,8
Дигестат 100 м <sup>3</sup> /га	<u>13,8</u> 33,6	<u>12,7</u> 18,7	<u>7,5</u> 10,9	<u>6,4</u> 9,3	<u>5,6</u> 7,7
<i>HIP</i> <sub>05</sub>	<u>0,7</u> 1,4	<u>0,6</u> 0,7	<u>0,6</u> 0,6	<u>0,5</u> 0,5	<u>0,5</u> 0,4
Стадія ВВСН 92					
Без підживлення (контроль)	<u>2,4</u> 5,3	<u>2,5</u> 4,5	<u>2,4</u> 3,6	<u>1,9</u> 3,3	<u>1,5</u> 2,7
Азотні добрива (N <sub>109</sub> )	<u>2,7</u> 7,6	<u>2,9</u> 4,8	<u>2,4</u> 3,9	<u>1,8</u> 3,4	<u>1,4</u> 2,7
Дигестат 30 м <sup>3</sup> /га	<u>3,0</u> 8,9	<u>3,2</u> 5,0	<u>2,3</u> 3,7	<u>2,0</u> 3,4	<u>1,5</u> 2,8
Дигестат 50 м <sup>3</sup> /га	<u>3,4</u> 9,6	<u>3,4</u> 5,2	<u>2,5</u> 3,8	<u>2,1</u> 3,4	<u>1,6</u> 2,8
Дигестат 70 м <sup>3</sup> /га	<u>3,8</u> 10,8	<u>3,8</u> 5,8	<u>2,6</u> 4,2	<u>2,1</u> 3,5	<u>1,8</u> 2,9
Дигестат 100 м <sup>3</sup> /га	<u>4,7</u> 11,7	<u>3,9</u> 6,8	<u>2,7</u> 4,5	<u>2,1</u> 3,4	<u>1,9</u> 3,0
<i>HIP</i> <sub>05</sub>	<u>0,3</u> 0,7	<u>0,3</u> 0,4	<u>0,2</u> 0,3	<u>0,1</u> 0,2	<u>0,1</u> 0,1

Примітка.\* Над рисою – вміст N–NO<sub>3</sub><sup>-</sup>; під рисою – N–NH<sub>4</sub><sup>+</sup>.

Завдяки внесенню азотних добрив і дигестату відбувалось суттєве підвищення вмісту амонійного азоту. Найвищий його вміст був у шарах ґрунту 0–20 і 20–40 см у варіанті досліді Дигестат 100 м<sup>3</sup>/га – відповідно 20,8 і 12,6 мг/кг. При цьому не спостерігалось суттєвих змін вмісту азоту амонійних



сполук під впливом підживлень у більш глибоких шарах ґрунту. Хоч у ранньовесняний період процеси нітрифікації пригнічувались і в ґрунті контрольного варіанту вміст азоту нітратів становив у шарах ґрунту 0–20 і 20–40 см відповідно 9,1 і 8,2 мг/кг, від удобрення спостерігалось підвищення його вмісту. Так, у варіанті дослід з підживленням азотними добривами ( $N_{109}$ ) вміст азоту нітратних сполук у шарах ґрунту 0–20 і 20–40 см був відповідно 10,5 і 9,5 мг/кг, а у варіанті з підживленням дигестатом у дозі 30 м<sup>3</sup>/га відповідно 12,8 і 9,7 мг/кг. Це свідчить про те, що дигестат є дієвим чинником впливу на азотний режим ґрунту на початку відновлення вегетації рослин пшениці озимої. Під впливом зростаючих доз дигестату вміст азоту нітратних сполук у шарі ґрунту 0–100 см істотно зростав і найвищим був у варіанті дослід з внесенням 100 м<sup>3</sup>/га дигестату.

У фазу початку виходу в трубку пшениці озимої завдяки прогріванню ґрунту, зменшенню вологості, поліпшувалась його аерації, що створювало кращі умови для проходження процесів нітрифікації. При цьому зменшувалось відношення між нітратною та амонійною формами мінерального азоту. Вміст азоту нітратних сполук у ґрунті зростав і на неудобрених ділянках становив у шарах ґрунту 0–20 і 20–40 см відповідно 12,0 і 9,8 мг/кг. Внесення високих доз дигестату – 50–100 м<sup>3</sup>/га сприяло істотному підвищенню вмісту азоту нітратів у шарі ґрунту 0–20 см, на 2,7–12,2 мг/кг порівняно з підживленням азотними добривами.

Проведеними дослідженнями не було встановлено істотних змін вмісту азоту нітратних сполук під час вегетації пшениці озимої у шарі ґрунту 40–100 см, де його вміст становив від 9,1 до 12,9 мг/кг ґрунту залежно від варіанту дослід і строку визначення.

Вміст азоту амонійних сполук у ґрунті в період початку виходу рослин пшениці озимої у трубку дещо зростав і в шарах 0–20 і 20–40 см у контролі становив 18,5 і 14,2 мг/кг. Під впливом підживлення дигестатом вміст його у шарі ґрунту 0–20 см зростав пропорційно дозі внесених добрив у всіх варіантах дослід. На вміст азоту амонійних сполук у шарі ґрунту 40–100 см

як азотні добрива, так і дигестат суттєвого впливу не мали. Найвищий його вміст у шарі ґрунту 0–100 см спостерігався у варіанті досліді з підживленням пшениці озимої дигестатом дозою 100 м<sup>3</sup>/га.

У фазу колосіння рослин пшениці озимої вміст азоту нітратних сполук у ґрунті зменшувався. Це можна пояснити впливом ущільнення ґрунту, зменшенням його вологості та засвоєнням його рослинами і мікроорганізмами. В цей час у контрольному варіанті в шарах ґрунту 0–20 і 20–40 см вміст азоту нітратних сполук становив відповідно 7,9 і 8,7 мг/кг. Це свідчить, що у шарі ґрунту 20–40 см процеси нітрифікації проходили краще. Вміст нітратів у шарі ґрунту 0–20 см зростав у варіантах досліді з внесенням удобрювальних продуктів з 9,9 мг/кг у варіанті Дигестат 30 м<sup>3</sup>/га до 13,8 мг/кг у варіанті Дигестат 100 м<sup>3</sup>/га. Слід зазначити, що в цей час варіанти досліді з внесенням високих доз дигестату мали істотну перевагу за вмістом азоту нітратних сполук у шарі ґрунту 0–20 см. Найвищий вміст нітратів у шарі ґрунту 20–40 см був у варіанті досліді Дигестат 100 м<sup>3</sup>/га – 12,7 мг/кг. Варіант досліді з дворазовим підживленням азотними добривами був рівноцінним за вмістом азоту нітратних сполук у шарі ґрунту 20–40 см з варіантом Дигестат 30 м<sup>3</sup>/га, оскільки вміст нітратів змінювався від 10,9 до 10,5 мг/кг, що знаходиться в межах похибки досліді. Вміст нітратного азоту в шарах ґрунту 40–60 см, 60–80 і 80–100 см під впливом систем удобрення, що застосовувалися в досліді, не змінювався.

Вміст азоту амонійних сполук в фазу колосіння зменшувався в зв'язку зі зниженням вологості ґрунту і засвоєння на ростові процеси рослинами і мікроорганізмами. У контрольному варіанті досліді без підживлень у шарах ґрунту 0–20 і 20–40 см його вміст становив відповідно 12,4 і 9,7 мг/кг. У варіантах досліді з внесенням дигестату найвищий вміст азоту амонійних сполук у шарах ґрунту 0–20 і 20–40 см був у варіанті Дигестат 100 м<sup>3</sup>/га, відповідно 33,6 і 18,7 мг/кг. Варіанти з внесенням дигестату мали перевагу за вмістом азоту амонійних сполук у шарі ґрунту 0–20 см. На вміст азоту

амонійних сполук у шарах ґрунту 40–60 см, 60–80 і 80–100 см дози, форми і строки внесення удобрювальних продуктів істотного впливу не мали.

У фазу повної стиглості пшениці озимої завдяки використанню рослинами, а також зниження процесів мінералізації вміст азоту нітратних і амонійних сполук у ґрунті зменшувався. Однак у варіантах з внесенням дигестату в шарах ґрунту 0–20 і 20–40 см він був вищим порівняно з варіантом дослід, де проводилися підживлення азотними синтетичними добривами. На вміст азоту мінеральних сполук у глибших шарах ґрунту удобрювальні продукти суттєвого впливу не мали.

В цілому, за характеристикою динаміки вмісту азоту нітратних і амонійних сполук у ґрунті, необхідно зазначити, що вона мала подібний характер. Вміст азоту мінеральних сполук у ґрунті залежав не лише від погодних умов та доз і строків внесення удобрювальних продуктів, а й від фази росту й розвитку рослин пшениці озимої. У фазу початку відновлення весняної вегетації пшениці озимої вміст азоту нітратних і амонійних сполук визначався погодними умовами і дозою внесення азоту з удобрювальними продуктами. У фазу початку виходу рослин у трубку їх вміст був найвищим і завдяки поліпшенню проходження процесів нітрифікації відношення між нітратною і амонійною формами азоту зменшувалось. У фазу колосіння з ростом і розвитком рослин та в міру використання рослинами пшениці озимої вміст азоту нітратних і амонійних сполук зменшувався. Найменший вміст мінерального азоту в ґрунті був у фазу повної стиглості пшениці озимої.

Вологість зерна пшениці озимої також залежала від удобрення й підвищувалась залежно від системи удобрення на 5–17 % (табл. 4.4). При цьому найменше підвищення вологості зерна (на 5 %) порівняно з контролем спостерігалось у варіанті дослід з підживленням дигестатом дозою 30 м<sup>3</sup>/га.

Порівняно з виробничим контролем (Азотні добрива (N<sub>109</sub>), за внесення дигестату в дозах 30–70 м<sup>3</sup>/га вологість зерна пшениці озимої знижувалась на 1–5 %, тоді як з дози 100 м<sup>3</sup>/га – підвищувалась на 6 %. Отже, внесення невисоких доз дигестату (30 м<sup>3</sup>/га) істотно не впливає на вологість зерна під час

його збирання порівняно із зерном пшениці озимої, вирощеної за традиційної системи удобрення.

Таблиця 4.4

**Вологість зерна пшениці озимої під час збирання залежно від ранньовесняного підживлення різними дози дигестату, 2021 р.**

Варіант дослід	Вологість зерна		
	%	Зміна, $\pm\%$ до	
		контролю	N <sub>109</sub>
Без підживлення (контроль)	11,0	–	–10
Азотні добрива (N <sub>109</sub> )	12,2	11	–
Дигестат 30 м <sup>3</sup> /га	11,6	5	–5
Дигестат 50 м <sup>3</sup> /га	12,1	10	–1
Дигестат 70 м <sup>3</sup> /га	12,0	9	–2
Дигестат 100 м <sup>3</sup> /га	12,9	17	6
<i>HIP</i> <sub>05</sub>	0,6		

Добре відомо, що достатнє забезпечення зернових культур поживними речовинами має важливе значення у виробництві високоякісного зерна. Серед всіх елементів живлення азот особливо важливий для рослин, оскільки він зазвичай визначає як рівень урожайності, так і хлібопекарську якість пшениці через його вплив на вміст білка в зерні [225].

Як видно з даних табл. 4.5, показники якості зерна значно змінювалися залежно від систем удобрення пшениці озимої. Внесення дигестату порівняно з абсолютним контролем достовірно не впливало на показник маси 1000 зерен. Проте, порівняно з виробничим контролем (Азотні добрива (N<sub>109</sub>)) вона зменшувалася на 15–21 %. При цьому збільшувалась кількість невиконаних зерен з 1,44 % до 3,02–4,34 % залежно від дози дигестату. Найбільше невиконаних зерен у досліді було у пшениці з ділянок без удобрення та за внесення 100 м<sup>3</sup>/га дигестату – відповідно 4,24 і 4,34 %.

На удобрених ділянках посіви пшениці озимої формували зерно з більшою натурою на 9–21 %. При цьому, порівняно з виробничим контролем за всіх доз внесення дигестату натура зерна знижувалась, а між варіантами досліді з дозами дигестату істотної різниці не було виявлено.

**Показники якості зерна пшениці озимої за різних доз внесення  
дигестату, 2021 р.**

Показник	Без піджив- лення (контроль)	Азотні добрив а (N <sub>109</sub> )	Доза дигестату, м <sup>3</sup> /га				HIP <sub>05</sub>
			30	50	70	100	
Маса 1000 зерен, г	33,4	41,2	32,6	34,1	35,0	33,9	1,7
Невиповнені зерна, %	4,24	1,44	3,02	3,02	3,08	4,34	0,16
Натура, г/л	576	698	644	651	649	625	33
Вміст білка, %	9,9	12,3	13,2	15,4	15,8	16,2	0,6
Склоподібні зерна, %	16	24	33	31	40	36	2
Склоподібність, %	23	31	40	41	48	46	3
Вміст клейковини, %	18,3	22,8	22,8	29,4	30,5	30,1	1,7
Якість клейковини, од.	76	78	81	83	90	86	4
Число падіння, с	278	295	366	351	358	363	18
Сажкове зерно, %	0,10	0,08	0,10	0,06	0,08	0,10	0,04
Фузаріозні зерна, %	0,26	0,12	0,36	0,48	0,40	0,44	0,13

Вміст білка в зерні пшениці озимої є важливим показником його якості. Залежно від варіанту досліду він змінювався від 9,9 до 16,2 %. Найбільший вплив на підвищення вмісту білка в зерні мало підживлення посівів дигестатом. Порівняно з виробничим контролем він підвищувався на 7–32 % залежно від дози дигестату. Це, на нашу думку, можна пояснити ліпшим забезпеченням рослин азотом завдяки вищим дозам його внесення, а також інтенсивнішим засвоєнням з нього азоту в кінці вегетації.

Вміст клейковини у зерні пшениці озимої залежно від системи удобрення мав такі ж закономірності формування, як і показник вмісту білка. Найбільшим він був за високих доз внесення дигестату (50–100 м<sup>3</sup>/га), що на 29–34 % більше порівняно з виробничим контролем (Азотні добрива (N<sub>109</sub>)). Показник якості клейковини і число падіння підвищувалися за внесення добрив і повторювали такі ж закономірності, як і вміст клейковини у зерні пшениці озимої.

Поліпшення мінерального живлення рослин пшениці озимої завдяки удобренню сприяло підвищенню кількості склоподібних зерен у зерновій масі з 16 до 24–49 % залежно від варіанту удобрення. При цьому склоподібність зерна також підвищувалась з 23 до 31–48 %. Необхідно також зазначити, що ці два показники були вищими за підживлення пшениці озимої дигестатом, порівняно з мінеральними азотними добривами.

Частка сажкових зерен у зерновій масі пшениці озимої достовірно не змінювалась, а заражених фузаріозом – зростала за внесення дигестату у високих дозах – 50–100 м<sup>3</sup>/га. При цьому необхідно зазначити, що найменше фузаріозних зерен (0,12 %) було за традиційної системи удобрення пшениці озимої, тоді як підживлення дигестатом підвищувало цей показник у три і більше разів.

Якщо аналізувати якісні показники зерна та його врожайність, одержані в досліді, то кількість клейковини і білка в зерні з ділянок досліді з внесенням дигестату були вищими, ніж на виробничому контролі (Азотні добрива), крім варіанту з дозою внесення рідкого дигестату 30 м<sup>3</sup>/га (див. табл. 4.5). Так, якщо порівнювати валовий збір білка з одного гектара, то у виробничому контролі він становить 677 кг, а у варіантах досліді з внесенням дигестату: 30 м<sup>3</sup>/га – 639, 50 м<sup>3</sup>/га – 752, 70 м<sup>3</sup>/га – 786 і 100 м<sup>3</sup>/га – 786 кг.

## **4.2 Умови формування продуктивності пшениці озимої за різних систем удобрення**

Кінцевою метою вирощування пшениці озимої є отримання високого та якісної врожаю зерна. Врожайність є найбільш інтегральним показником оцінювання ефективності застосування дигестату. Вченими було проведено значну кількість досліджень щодо його впливу на формування продуктивності різних сільськогосподарських культур [295]. Дослідженнями [313] встановлено, що заміна дигестатом частини мінеральних добрив сприяє підвищенню економічної ефективності вирощування окремих

сільськогосподарських культур. При цьому врожай культур у разі заміни мінеральних добрива дигестатом зазвичай був більшим, ніж за внесення лише мінеральних добрив.

Заміна мінерального добрива дигестатом підвищує вміст основних елементів живлення в ґрунті під пшеницею озимою [310]. При цьому вміст азоту мінеральних сполук збільшувався на 15 %, рухомих фосфатів – на 35, тоді як рухомих сполук калію лише на 6 %. Поліпшується здатність ґрунту утримувати добрива та його буферні властивості.

Зазначається [272], що азот сприяє створенню оптимальних умов для росту пшениці та підвищує вміст білка в зерні, але при цьому знижується вміст крохмалю. Оскільки нітратний азот одна з найбільш рухомих поживних речовин у ґрунті, він вимагає обережності управління. Необхідно оцінювати доцільність внесення високих доз азотних добрив, оскільки це може призвести до збільшення вимивання нітратів, що, у свою чергу, сприяє евтрофікації поверхневих вод. Встановлено [312], що дигестат може сприяти збільшенню вмісту азоту та хлорофілу в листах, підвищувати інтенсивність процесу фотосинтезу, транспірацію та продихову провідність. Інтенсивність фотосинтезу залежить від вмісту хлорофілу та активності карбоксилази, основною складовою яких є азот, тому належне забезпечення ним рослин подовжує період фотосинтетичної діяльності листків [306]. За недостатнього або надмірного засвоєння азоту може відбуватися зниження вмісту хлорофілу в листках і завчасне їх старіння [350]. Тому зменшення внесення азоту з дигестатом знижує продуктивність фотосинтезу рослин пшениці озимої та її урожайність. Внесення дигестату в підживлення в поєднанні з необхідною кількістю карбаміду позитивно впливає на функціонування листкового апарату, продуктивність фотосинтезу та формування врожаю.

Застосування в системі удобрення пшениці озимої дигестату, порівняно з удобренням лише мінеральними добривами та їх поєднанням, підвищує індекс врожаю. Це пояснюється поліпшенням росту й розвиток різних органів рослин у більш пізній період вегетації. Зі збільшенням частки дигестату в системі

удобрення зниження врожайності пшениці озимої може бути пов'язано з надмірним ростом рослин і пізнім досяганням зерна [419].

Для вимірювання значень забезпеченості азотом пшениці озимої у фази кушіння та колосіння рослин у проведених дослідженнях використовували портативний прилад «N-тестер». Цей метод вимірювання використовує пряму пропорційну залежність значень вмісту хлорофілу до концентрації азоту в листках [354]. Отже, ці значення дозволяють зробити висновки про рівень постачання азоту рослинам [278]. Вимірювання проводили у середині верхівкових повністю сформованих листків пшениці озимої.

Як показали проведені вимірювання, забезпеченість пшениці озимої азотом змінювалася як від особливостей удобрення, фази росту й розвитку рослин, так і від погодних умов і становила 310–731 од. приладу (табл. 4.6). При цьому необхідно зазначити, що рослини пшениці озимої краще були забезпечені азотом за погодних умов 2023 року. Так, на контрольних ділянках посіву показник приладу був вищим на стадії кушіння рослин на 10 %, а колосіння – на 6 %. У виробничому контролі ці показники відповідно становили 11 і 9 %, що свідчить про вплив погодних умов на ефективність азотних добрив забезпечувати рослини азотом.

Таблиця 4.6

**Забезпеченість пшениці озимої азотом за показниками портативного приладу «N-тестер», од.**

Варіант досліджу	Фаза росту й розвитку рослин			
	Кушіння		Колосіння	
	2022 р.	2023 р.	2022 р.	2023 р.
Без підживлення (контроль)	311	342	389	411
Азотні добрива (N <sub>109</sub> )	435	484	463	505
Дигестат 10 м <sup>3</sup> /га	438	533	472	546
Дигестат 20 м <sup>3</sup> /га	534	692	563	642
Дигестат 30 м <sup>3</sup> /га	624	724	652	731
<i>HIP</i> <sub>05</sub>	36	41	31	45

На ділянках досліджу з підживленням посівів дигестатом вже в дозі 10 м<sup>3</sup>/га забезпеченість пшениці озимої азотом не поступалась виробничому контролю,



а в 2023 році у фазу кушіння рослин навіть була ліпшою – 533 проти 484 од. за показника  $НІР_{05}$  41 од. З підвищенням доз внесення дигестату до 20–30 м<sup>3</sup>/га забезпеченість рослин азотом достовірно підвищувалася незалежно від погодних умов і фази розвитку рослин.

Отже, можна зробити висновок, що заміна в традиційній системі удобрення азотних мінеральних добрив дигестатом спостерігалась тенденція поліпшення азотного живлення рослин пшениці озимої в кінці вегетації.

Урожайність і складові продуктивності урожаю пшениці озимої тісно пов'язані між собою. Внесення хімічних мінеральних добрив та дигестату збільшує густоту продуктивного стеблостою, кількість зерен у колосі та масу 1000 зерен. Урожайність зерна суттєво корелює з цими показниками, а її коефіцієнт становить відповідно 0,96, 0,97 і 0,87. Найвищий зв'язок встановлено між урожайністю та кількістю зерен у колосі [419].

Проведеними дослідженнями встановлено, що внесення дигестату в дозах від 10 до 30 м<sup>3</sup>/га у вигляді ранньовесняного підживлення по різному впливало на формування врожайності пшениці озимої (табл. 4.7). Як дигестат, так і внесення хімічних азотних добрив сприяли збільшенню врожайності пшениці озимої і забезпечувалась достовірна різниця порівняно з контролем.

Таблиця 4.7

**Урожайність пшениці озимої залежно від підживлення азотними добривами і дигестатом, т/га**

Варіант досліджу	Рік проведення дослідження		Середня за два роки	Приріст урожайності до контролю	
	2022	2023		т/га	%
Без підживлення (контроль)	5,42	6,57	6,00	—	—
Азотні добрива (N <sub>109</sub> )	7,86	9,04	8,47	2,47	41
Дигестат 10 м <sup>3</sup> /га	7,64	8,68	8,16	2,16	36
Дигестат 20 м <sup>3</sup> /га	7,46	7,18	7,32	1,32	22
Дигестат 30 м <sup>3</sup> /га	6,79	6,41	6,60	0,60	10
<i>НІР</i> <sub>05</sub>	0,39	0,49			

Як видно з даних табл. 4.7, залежно від варіанту дослідів врожайність зерна змінювалася від 5,42 до 9,04 т/га залежно від варіанту дослідів та погодних умов, тобто зміни склали 67 %.

Умови довкілля впродовж вегетаційного періоду мають вирішальний вплив на формування врожаю [121, 132]. Встановлено, що кращі умови формування зерна склалися в 2023 році, коли приріст урожайності порівняно з 2022 роком на контрольних ділянках склав 1,15 т/га або 21 %, а у виробничому контролі (варіант Азотні добрива) – 1,18 т/га або 15 %.

В умовах 2022 року за підживлення пшениці озимої дигестатом у дозі 10 м<sup>3</sup>/га зниження врожайності зерна порівняно з варіантом дослідів з внесення азотних добрив у дозі 109 кг/га д. р. було в межах помилки дослідів. Підвищення дози дигестату до 20 і 30 м<sup>3</sup>/га дозволяло отримати достовірні прирости урожайності зерна – відповідно 2,04 і 1,37 т/га (за врожайності на контролі 5,42 т/га). При цьому вони були нижчими, порівняно з ділянками дослідів, де пшеницю озиму підживлювали азотними мінеральними добривами.

В умовах 2023 року спостерігалась така ж закономірність дії варіантів системи удобрення на формування врожайності пшениці озимої, але порівняно з 2022 роком підвищення дози внесення дигестату з 10 до 20 м<sup>3</sup>/га достовірно знижувало врожайність зерна – на 0,50 т/га або на 13 %.

У середньому за два роки проведення досліджень приріст урожайності пшениці озимої залежно від систем удобрення був 0,60–2,47 т/га або на 10–41 %. При цьому необхідно зазначити, що за внесення дигестату в дозі 10 м<sup>3</sup>/га врожайність порівняно з виробничим контролем (підживлення азотними добрива, 109 кг/га д. р.) знижувалася лише на 0,31 т/га або на 4 %. Це можна пояснити низкою чинників. Підживлення пшениці озимої в досліді азотними добривами проводилося двічі за вегетаційний період, а дигестат вносився лише наповесні. Крім того, в дигестаті не весь азот знаходиться у формі легкодоступних мінеральних сполук, що сприяє продовженню його дії у часі, тобто він може бути засвоєний рослинами у кінці вегетації, коли рівень

урожаю був уже сформований. Такий азот може впливати на поліпшення показників якості зерна.

Отже, з проведених досліджень можна зробити висновок, що за ранньовесняного підживлення пшениці озимої дигестатом у дозі 10 м<sup>3</sup>/га спостерігалась лише тенденція зниження врожайності зерна (на 4 %) порівняно з традиційною системою удобрення, яка передбачає внесення азотних добрив у дозі 109 кг/га д. р. у два строки. Підвищення дози внесення дигестату до 20 і 30 м<sup>3</sup>/га знижувало врожайність зерна відповідно на 14 % і 22 %.

Важливим чинником продуктивності пшениці озимої є якість зерна, яка визначається різними показниками. Хімічний склад зерна пшениці, який включає вуглеводи, білки, харчові волокна, ліпіди, мінерали та вітаміни [330], робить його цінним джерелом їжі та має важливе значення у виробництві високоякісного зерна та продуктів переробки [275]. Наприклад, вміст білка суттєво впливає на якість, технологічні властивості та харчову цінність борошна, що робить його важливим чинником для фермерів при виборі сортів пшениці та встановленні агрономічних стратегій управління формування врожаю [301].

На вміст білка в зерні пшениці озимої впливають різні чинники, які включають агротехнологію, умови доквілля та генетичні особливості сортів пшениці [132]. Встановлено, що на накопичення і склад білка в зернівках пшениці впливають дози, строки і способи внесення азотних добрив. На формування білкового комплексу зернових культур також мають вплив метеорологічні умови: за дощової погоди, кількість протеїну зменшується до 6–9 %, а під час посухи може збільшуватися до 13–20 % сухої речовини [132].

Застосування дигестату, отриманого анаеробною ферментацією свинячого гною, порівняно з мінеральними добривами, не мало істотного впливу на якість зерна пшениці озимої [243]. У дослідженнях [389] із системами сівозмін, встановлено, що дигестат може замінити на озимих

культурах – пшениці й ріпаку внесення мінеральних добрив і частково поліпшити якість зерна пшениці.

Проведеними дослідженнями встановлено, що показники якості зерна пшениці озимої змінювалися як від погодних умов, так і від особливостей удобрення (табл. 4.8). Тоді як погодні умови для формування врожаю зерна були більш сприятливими у 2023 році, то для формування його якості – у 2022 році.

Таблиця 4.8

**Показники якості зерна пшениці озимої за різних систем удобрення**

Показник	Варіант досліджу					НІР <sub>05</sub>
	Без під- живлення (контроль)	Азотні добрива (N <sub>109</sub> )	Доза дигестату, м <sup>3</sup> /га			
			10	20	30	
1	2	3	4	5	6	7
2022 рік						
Маса 1000 зерен, г	31,4	33,7	34,1	37,2	36,5	0,9
Невиповнені зерна, %	6,22	4,36	4,21	4,11	4,02	0,32
Натура, г/л	592	721	726	729	731	48
Вміст білка, %	9,0	11,1	11,4	11,7	11,8	1,2
Склоподібні зерна, %	14	23	26	30	32	2
Склоподібність, %	20	27	31	35	37	3
Вміст клейковини, %	19,7	24,6	25,8	25,9	26,9	1,5
Якість клейковини, од.	80	84	82	83	84	6
Число падіння, с	286	290	295	300	306	16
Сажкове зерно, %	0,08	0,07	0,06	0,07	0,05	0,01
Фузаріозні зерна, %	0,10	0,12	0,13	0,24	0,32	0,08
2023 рік						
Маса 1000 зерен, г	31,0	32,4	32,8	32,7	32,4	1,7
Невиповнені зерна, %	5,34	3,12	3,02	2,78	2,71	0,15
Натура, г/л	602	713	719	722	725	38
Вміст білка, %	8,5	10,3	10,7	11,2	11,6	0,6
Склоподібні зерна, %	13	20	24	28	30	2
Склоподібність, %	16	23	28	30	32	3

Продовження таблиці 4.8

1	2	3	4	5	6	7
Вміст клейковини, %	19,1	22,8	23,6	24,9	25,9	1,5
Якість клейковини, од.	74	79	77	80	81	5
Число падіння, с	301	322	325	329	334	17
Сажкове зерно, %	0,13	0,11	0,11	0,10	0,12	0,05
Фузаріозні зерна, %	0,08	0,11	0,12	0,19	0,26	0,07
У середньому за 2022–2023 рр.						
Маса 1000 зерен, г	31,2	33,1	33,5	35,0	34,5	
Невиповнені зерна, %	5,78	3,74	3,61	3,45	3,37	
Натура, г/л	597	717	723	723	728	
Вміст білка, %	8,8	10,7	11,1	11,5	11,7	
Склоподібні зерна, %	14	22	25	29	31	
Склоподібність, %	18	25	30	33	35	
Вміст клейковини, %	19,4	23,7	24,7	25,4	26,4	
Якість клейковини, од.	77	82	80	82	83	
Число падіння, с	294	306	310	315	320	
Сажкове зерно, %	0,11	0,09	0,09	0,09	0,09	
Фузаріозні зерна, %	0,09	0,12	0,13	0,22	0,29	

У середньому за два роки проведення досліджень удобрення сприяло підвищенню маси 1000 зерен з 31,2 до 33,1–35,0 г або на 6–12 %. При цьому простежувалась тенденція її підвищення за удобрення дигестатом порівняно з варіантом дослідів Азотні добрива (N<sub>109</sub>). Це можна пояснити зменшенням кількості невиповнених зерен з 3,74 % до 3,37–3,61 % залежно від дози дигестату. При цьому натура зерна підвищувалась від внесення добрив на 20–22 %, але не залежала від системи їх застосування.

Важливим показником якості зерна пшениці є вміст білка. Встановлено, що всі системи удобрення, що вивчалися в досліді, в усі роки проведення досліджень сприяли підвищенню його вмісту. При цьому необхідно зазначити, що у варіантах дослідів з внесенням дигестату спостерігалась тенденція підвищення вмісту білка в зерні порівняно з виробничим контролем на 4–9 %. Це можна пояснити кращим забезпеченням пшениці озимої азотом у кінці

вегетації, коли він необхідний рослинам для формування якості. Краще забезпечення азотом сприяло також збільшенню в зерновій масі кількості склоподібних зерен на 57–121 % і склоподібності зерна з 18 до 25–35 % залежно від варіанту досліду. Порівняно з виробничим контролем склоподібність зерна підвищувалась за підживлення дигестатом на 20–40 % залежно від дози його внесення.

Вміст клейковини пшениці озимої є важливим показником хлібопекарських якостей зерна. В середньому за два роки проведення досліджень за різних систем удобрення він був вищим порівняно з контролем на 22–36 %. При цьому, порівняно з виробничим контролем, достовірне підвищення вмісту клейковини у зерні в обидва роки проведення досліджень спостерігалось за дози внесення дигестату 30 м<sup>3</sup>/га, тоді як за дози 20 м<sup>3</sup>/га перевага була лише в умовах 2023 року.

Поряд з кількістю клейковини у зерні пшениці озимої, удобрення сприяло підвищенню її якості на 5–6 од. і числа падіння на 12–26 с за показників на контролі відповідно 77 од. і 294 с. При цьому істотної різниці між системами удобрення за два роки проведення досліджень у проведених дослідах не було виявлено.

Щодо ураження зерна пшениці озимої хворобами, як погодні умови у період вегетації, так і системи застосування добрив також мали певний вплив. Так, в умовах 2022 року за удобрення дигестатом частка сажкових зерен зменшувалася з 0,08 % до 0,05–0,07 % залежно від дози його внесення. При цьому частка фузаріозних зерен була меншою в 2,5–3 рази за дози дигестату 20–30 м<sup>3</sup>/га.

В умовах 2023 року частка сажкових зерен у зерновій масі була більшою, проте різниця між варіантами досліду була в межах помилки досліду. При цьому частка фузаріозних зерен достовірно підвищувалась порівняно з контролем (на 138–225 %) за дози внесення дигестату 20–30 м<sup>3</sup>/га.

Отже, можна зробити висновок, що ранньовесняне підживлення пшениці озимої дигестатом дозою 10–30 м<sup>3</sup>/га не поступається традиційній системі її удобрення синтетичними азотними добривами.

Збір білка з урожаєм зерна з одиниці площі посіву пшениці озимої є важливим показником її продуктивності. Дослідженнями встановлено, що він залежав як від систем застосування добрив, так і від погодних умов (табл. 4.9).

Таблиця 4.9

**Збір білка з урожаєм зерна пшениці озимої залежно від системи застосування добрив, кг/га**

Варіант досліджу	Рік проведення дослідження		Середнє за два роки	Приріст збору білка до контролю	
	2022	2023		кг/га	%
Без підживлення (контроль)	488	558	523	—	—
Азотні добрива (N <sub>109</sub> )	872	931	902	379	72
Дигестат 10 м <sup>3</sup> /га	871	929	900	377	72
Дигестат 20 м <sup>3</sup> /га	873	804	839	316	60
Дигестат 30 м <sup>3</sup> /га	801	679	740	217	41

Як видно з даних табл. 4.9, добрива сприяють підвищенню збору білка на 217–379 кг/га або на 41–72 % залежно від систем удобрення пшениці озимої. Підживлення пшениці озимої дигестатом у дозі 10 м<sup>3</sup>/га дозволяло в середньому за два роки проведення досліджень отримувати збір білка на рівні традиційної системи удобрення синтетичними мінеральними добривами, тоді як підвищення дози дигестату до 20 і 30 м<sup>3</sup>/га знижувала цей показник відповідно на 16 і 42 %. Це свідчить про недоцільність ранньовесняного підживлення посівів пшениці озимої високими дозами дигестату.

#### **4.3 Винесення основних елементів живлення з урожаєм пшениці озимої за різних систем удобрення та їх баланс у ґрунті**

Пшениця озима для формування врожаю засвоює з ґрунту значну кількість основних елементів живлення (табл. 4.10).

**Винесення основних елементів живлення з урожаєм пшениці озимої  
за різних систем удобрення, кг/га**

Варіант досліджу	Винесення					
	зерном			зерном і відповідною кількістю соломи		
	N	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	K <sub>2</sub> O	N	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	K <sub>2</sub> O
Без підживлення (контроль)	102,0	37,2	25,2	132,0	60,6	102,0
Азотні добрива (N <sub>109</sub> )	171,9	57,6	39,8	223,6	95,7	167,7
Дигестат 10 м <sup>3</sup> /га	165,6	55,5	38,4	215,4	92,2	161,6
Дигестат 20 м <sup>3</sup> /га	148,6	49,8	34,4	193,2	82,7	144,9
Дигестат 30 м <sup>3</sup> /га	134,0	44,9	31,0	174,2	74,6	130,7

Як видно з даних табл. 4.10, найбільше пшеницею озимою засвоюється азоту – 132,0–223,6 кг/га залежно від варіанту досліджу. На другому місці було засвоєння калію – 102,0–161,6 кг/га. Засвоєння фосфору становило 60,6–95,7 кг/га. Тобто основні елементи живлення на ділянках без добрив засвоюються у відношенні  $N : P_2O_5 : K_2O = 1 : 0,46 : 0,77$ , тоді як, наприклад за підживлення дигестатом, у відношенні  $1 : 0,43 : 0,75$ . Це свідчить про більш економніше використання фосфору й калію з ґрунту для формування врожаю. Необхідно також зазначити, що за дози дигестату 10 м<sup>3</sup>/га рослини пшениці озимої у середньому за два роки збільшували засвоєння з ґрунту азоту на 63 %, фосфору – на 52 і калію на 58 %.

У загальному винесенні основних елементів живлення зерном озимої пшениці на неудобрених ділянках найбільшу частку складає азот – 62 %, тоді як фосфор і калій – відповідно 23 і 15 %. За умови залишення соломи на полі з урожаєм виноситься 77 % азоту, 62 – фосфору та 25 % калію від загального вмісту в надземній частині рослин. Це свідчить про те, що з добривами у ґрунт у першу чергу потрібно повернути з удобрювальними продуктами винесений азот і фосфор.



Як уже зазначалося в описі методики проведення досліджень, у зв'язку з дуже високим вмістом у ґрунті дослідних ділянок рухомих сполук фосфору й калію, пшеницю озиму підживлювали лише азотними добривами (109 кг/га д. р.) і дигестатом (10–30 м<sup>3</sup>/га). Залежно від варіанту досліду в ґрунт, крім контрольного варіанту, вносилося 101–303 кг/га азоту, 97–291 – фосфору (P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>) та 77–231 кг/га (K<sub>2</sub>O) з урахуванням того, що дигестат з курячого посліду в середньому містив 1,01 % азоту, 0,97 – P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> і 0,77 % K<sub>2</sub>O на сиру масу.

З метою забезпечення сталого ведення виробництва продукції рослинництва для розроблення ефективної системи удобрення в сівозміні зазвичай застосовують балансовий метод розрахунку необхідних доз поживних речовин. Основою балансового методу є співставлення джерел їх надходження в ґрунт та їх винесення врожаєм сільськогосподарських культур із зібраним урожаєм. Серед основних чинників, що впливають на баланс поживних речовин у ґрунті є величина врожаю та вміст у ньому елементів живлення.

Баланс елементів живлення є основою оптимізації системи застосування добрив, що запобігає внесенню надлишку елементів живлення та досягається безпечне техногенного навантаження на довкілля. Досягнення формування сталої продуктивності пшениці озимої потребує формування додатного балансу елементів живлення в ґрунті. При цьому дози, форми і способи внесення добрив повинні забезпечити оптимальне живлення рослин [31]. Розрахунок балансу елементів живлення на окремій земельній ділянці є зручним і важливим чинником планування господарської діяльності та прогнозування її наслідків [16]. Поряд з цим це не є відображає реального стану ґрунтів, а лише оцінює їх найближчі ймовірні позитивні або негативні зміни.

Найефективнішою у формуванні додатного балансу поживних речовин і мінерального живлення рослин є органо-мінеральна система удобрення [46]. Однак нині рослинництво потерпає від дефіциту органічних добрив, а в

структурі балансу елементів живлення основна частка належить мінеральним добривам, використанню на добриво нетоварної частини урожаю сільськогосподарських культур [92].

Найважливішою складовою системи удобрення пшениці озимої є азотна [132]. Для розрахунку балансу азоту необхідно враховувати багато джерел надходження його в ґрунт і непродуктивні втрати. Нині азотні мінеральні добрива є основним джерелом надходження азоту в ґрунт, становлять основу його балансу та сприяють формуванню високих і сталих урожаїв якісного зерна пшениці озимої [132].

Для спрощення розрахунку балансу основних елементів живлення в досліді в частині їх вилучення та надходження було скорочено кількість однакових і зіставних статей. Так, кількість азоту, що може надходити у ґрунт з насіннєвим матеріалом і з атмосферними опадами, продукується вільноіснуючими азотфіксувальними мікроорганізмами прирівнюється до витрат його від звітрювання, ерозії та вимивання за межі кореневмісного шару ґрунту. Кількість фосфору та калію, що надходять з насіннєвим матеріалом і з атмосферними опадами, відповідають їх втратам від ерозії [29]. За такого припущення в кінцевому результаті розрахованого балансу в частині надходження залишається лише внесення елементів живлення з удобрювальними продуктами, а у вилученні – господарське вилучення з урожаєм.

Розрахунки показали, що з урахуванням надходження з удобрювальними продуктами і вилучення з поля з урожаєм пшениці озимої баланс основних елементів живлення в ґрунті у варіантах досліді змінювався в широких межах – азоту від –132,0 до 169,0 кг/га, фосфору – від –95,7 до 261,1 кг/га та калію від –167,7 до 200,0 кг/га (табл. 4.11).

Значний вплив на баланс елементів живлення в ґрунті мають умови використання соломи пшениці озимої. Якщо її видаляти з поля, то додатний баланс азоту в досліді в середньому за два роки проведення досліджень складався лише за внесення дигестату в дозах 20 і 30 м<sup>3</sup>/га – відповідно 8,8 і

28,8 кг/га. Додатний баланс фосфору (4,8 кг/га) вже забезпечувало внесення дигестату в дозі 10 м<sup>3</sup>/га, але при цьому баланс калію був від'ємним – 84,6 кг/га. Лише внесення 20 м<sup>3</sup>/га дигестату забезпечувало додатний баланс калію – 9,1 кг/га.

Таблиця 4.11

**Баланс основних елементів живлення та його інтенсивність при вирощування пшениці озимої за різних доз і строків внесення удобрювальних продуктів, 2022–2023 рр.**

Варіант досліджу	Баланс, кг/га			Інтенсивність балансу, %		
	N	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	K <sub>2</sub> O	N	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	K <sub>2</sub> O
За умови видалення соломи з поля						
Без підживлення (контроль)	–132,0	–60,6	–102,0	–	–	–
Азотні добрива (N <sub>109</sub> )	–114,6	–95,7	–167,7	48,7	–	–
Дигестат 10 м <sup>3</sup> /га	–114,4	4,8	–84,6	46,9	105,2	47,6
Дигестат 20 м <sup>3</sup> /га	8,8	111,3	9,1	104,6	234,6	106,3
Дигестат 30 м <sup>3</sup> /га	128,8	216,4	100,3	173,9	390,1	176,7
За умови залишення соломи на полі						
Без підживлення (контроль)	–102,0	–37,2	–25,2	–	–	–
Азотні добрива (N <sub>109</sub> )	–62,9	–57,6	–39,8	63,4	–	–
Дигестат 10 м <sup>3</sup> /га	–64,6	41,5	38,6	61,0	168,4	200,5
Дигестат 20 м <sup>3</sup> /га	53,4	144,2	119,6	135,9	349,5	447,7
Дигестат 30 м <sup>3</sup> /га	169,0	246,1	200,0	226,1	648,1	745,2

За умови забирання з поля поряд із зерном пшениці озимої, ще й соломи, показники балансу основних елементів живлення поліпшувалися. Так, за внесення 10 м<sup>3</sup>/га дигестату в ґрунті створювався додатний баланс фосфору (41,5 кг/га) і калію (38,6 кг/га), проте баланс азоту формувався від'ємним (–64,6 кг/га). Це свідчить, що за такої дози внесення дигестату пшеницю озиму потрібно додатково підживлювати азотними мінеральними добривами.

Інтенсивність балансу азоту вважається задовільною за показника 100–

110 %. Екологічно безпечна інтенсивність балансу фосфору й калію залежить від вмісту їх рухомих сполук у ґрунті і змінюється в широких межах – відповідно 80–280 % і 50–150 % [29].

Розрахунки показали, що за дози дигестату 10 м<sup>3</sup>/га, з агрохімічного та екологічного поглядів, найбільш сприятливо складалась інтенсивність балансу основних елементів живлення азоту – 46,9 %, фосфору – 105,2 і калію – 47,6 %.

За умови залишення соломи на полі після збирання врожаю зерна пшениці озимої вже внесення дигестату в дозі 10 м<sup>3</sup>/га забезпечувало додатний баланс фосфору й калію в ґрунті – відповідно 41,5 і 38,6 кг/га. Інтенсивність балансу елементів живлення при цьому складала: азоту 61,0 %, фосфору – 168,4 і калію 200,5 %. Внесення дигестату в дозах 20 і 30 м<sup>3</sup>/га створювало інтенсивність балансу основних елементів живлення 135,9–745,2 %, що може бути небезпечним з екологічного погляду [30].

Важливим показником агрохімічної ефективності застосування удобрювальних продуктів є коефіцієнт використання їх поживних речовин. Визначення цього показника різницевим методом, порівняно з неудобреними ділянками, дозволяє порівняти варіанти дослідів між собою (табл. 4.12).

Таблиця 4.12

**Коефіцієнти використання основних елементів живлення пшеницею озимою з удобрювальних продуктів (2022–2023 рр.), %**

Варіант дослідів	Елемент живлення		
	N	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	K <sub>2</sub> O
Азотні добрива (N <sub>109</sub> )	84,0	–	–
Дигестат 10 м <sup>3</sup> /га	82,6	32,6	77,4
Дигестат 20 м <sup>3</sup> /га	30,3	11,4	27,9
Дигестат 30 м <sup>3</sup> /га	13,9	4,8	22,0

Розрахунки показали, що найвищий коефіцієнт використання азоту пшеницею озимою був з азотних мінеральних добрив, внесених у вигляді підживлень – 84,0 %. Неістотно йому поступався варіант дослідів з внесенням

10 м<sup>3</sup>/га дигестату – 82,4 %. Подальше підвищення доз внесення дигестату значно (до 13,9–30,3 %) знижувало засвоєння з нього азоту.

Коефіцієнт засвоєння фосфору з дигестату залежав від дози його внесення і був найвищим за дози 10 м<sup>3</sup>/га – 32,6 %. Необхідно також зазначити високий коефіцієнт засвоєння калію з дигестату за дози внесення 10 м<sup>3</sup>/га – 77,4 %.

Отже, за внесення дигестату в дозі 10 м<sup>3</sup>/га коефіцієнт засвоєння з нього основних елементів живлення близькі до показників з традиційних мінеральних добрив [29, 112].

#### **Висновки до розділу 4**

Встановлено, що ранньовесняне підживлення пшениці озимої дигестатом поліпшує азотний режим ґрунту, що впливає на ріст і розвиток рослин і формування врожаю зерна та його якості й виявляється в наступному:

1. Вміст азоту мінеральних сполук у ґрунті залежить від дози його внесення з удобрювальними продуктами у підживлення та стадії розвитку рослин пшениці озимої і змінюється в шарі ґрунту 0–40 см. Підживлення пшениці озимої дигестатом наповесні, як і азотними добривами, поліпшує азотний режим ґрунту. При цьому встановлено, що внесення дигестату, порівняно з підживленням азотними добривами, поліпшує азотний режим ґрунту в кінці вегетації пшениці озимої.

2. Підживлення пшениці озимої дигестатом дозою 10 м<sup>3</sup>/га забезпечує живлення рослин азотом за показниками приладу N-тестер на рівні виробничого контролю (N<sub>109</sub>), тоді як за дози дигестату 20–30 м<sup>3</sup>/га забезпеченість рослин азотом достовірно підвищується.

3. Удобрення пшениці озимої азотними добривами (109 кг/га д. р.) і дигестатом забезпечує приріст урожайності 0,60–2,4 т/га або на 10–41 % і знижується зі збільшенням дози внесення дигестату з 10 до 20–30 м<sup>3</sup>/га. За дози дигестату 10 м<sup>3</sup>/га спостерігається лише тенденція до зниження урожайності зерна порівняно з виробничим контролем (N<sub>109</sub>) на 0,31 т/га або на 4 %.

4. Підживлення пшениці озимої дигестатом напровесні дозами більш як  $30 \text{ м}^3/\text{га}$  не сприяє достовірному підвищенню врожайності пшениці озимої. За його дози  $30 \text{ м}^3/\text{га}$  забезпечується формування достовірного приросту врожайності зерна –  $0,78 \text{ т/га}$  або на 15 % порівняно з контролем без підживлень, але при цьому поступається виробничому контролю з підживленнями посівів азотними мінеральними добривами дозою  $109 \text{ кг/га}$  д. р. Підвищення дози дигестату до 50 і  $70 \text{ т/га}$  достовірно не змінювало врожайність зерна порівняно з абсолютним контролем.

5. За внесення дигестату в дозі  $30\text{--}100 \text{ м}^3/\text{га}$  порівняно з традиційним підживлення азотними мінеральними добривами знижується маса 1000 зерен пшениці озимої і їх натура. При цьому в зерновій масі збільшується частка невивірених зерен і заражених фузаріозом, але підвищується склоподібність зерна, вміст у ньому білка й клейковини.

6. За збором білка з 1 га посіву пшениці озимої ( $639\text{--}786 \text{ кг}$ ) удобрення дигестатом не поступається, а за високих доз його внесення ( $50\text{--}100 \text{ м}^3/\text{га}$ ) переважає варіант досліду з підживлення посівів лише азотними мінеральними добривами ( $677 \text{ кг/га}$ ).

7. Зі збільшенням дози дигестату знижується стійкість рослин пшениці озимої до розвитку хвороб листків і колосу, зокрема піренофорозу, борошнистої роси, фузаріозу, кладоспоріозу та альтернаріозу, що пояснюється надлишковим живленням рослин азотом.

8. Вилигання посівів пшениці озимої у фазу колосіння за високих доз азоту внесених з дигестатом є основною причиною зниження врожайності зерна. Це погіршувало налив зерна та знижувало його масу. Тому на тих площах, де планується проводити підживлення пшениці озимій дигестатом, для зменшення ризиків полягання рослин унаслідок надлишкового їх азотного живлення у агротехнології потрібно передбачити застосування регуляторів росту рослин.

9. Посилення азотного живлення рослин на тлі внесення азотних добрив і дигестату підвищує вологість зерна під час його збирання на 5–17 % порівняно

з контролем (неудобреними ділянками). При цьому за внесення дигестату і дозі 30 м<sup>3</sup>/га вона була на рівні контролю.

10. На тлі підживлення дигестатом у дозі 30–100 м<sup>3</sup>/га порівняно з підживленням пшениці озимої азотними добривами, знижується маса 1000 зерен, натура зерна, але підвищується вміст у ньому білка та клейковини, поліпшується якість клейковин.

11. Ранньовесняне підживлення пшениці озимої дигестатом у дозі 10–30 м<sup>3</sup>/га за впливом на показники якості зерна не поступається традиційній системі її удобрення синтетичними азотними добривами. Зі збільшенням дози дигестату до 20 і 30 м<sup>3</sup>/га збір білка з одиниці площі посіву знижується відповідно на 16 і 42 %, що пояснюється зменшенням урожайності зерна.

12. Підживлення пшениці озимої дигестатом у дозі 10 м<sup>3</sup>/га забезпечує інтенсивність балансу азоту 61,0 %, фосфору – 168,4 і калію 200,5 %, що свідчить про необхідність додаткового внесення азоту та сприяє поліпшенню фосфорного й калійного режимів ґрунту. Коефіцієнт використання з дигестату азоту становить 82,6 %, фосфору – 32,6 й калію 77,4 % і знижується за дози його внесення 30 м<sup>3</sup>/га відповідно до 13,9 %, 4,8 і 22,0 %.

13. Продовжити дослідження щодо ефективності підживлення пшениці озимої меншими дозами дигестату та доцільності внесення під основний обробіток ґрунту на площах з пізніми строками сівби. Внесення дигестату, як органічного добрива, під пшеницю озиму також необхідно планувати під попередник. У такому випадку пшениця озима буде краще використовувати його післядію та знизяться ризики вилягання рослин і ураження їх грибковими хворобами.

Основні положення цього розділу викладені в таких наукових працях автора зі списку використаних джерел [42, 176, 178–180, 184, 187].

## РОЗДІЛ 5

### ФОРМУВАННЯ ПРОДУКТИВНОСТІ КУКУРУДЗИ ЗАЛЕЖНО ВІД СИСТЕМИ УДОБРЕННЯ

Кукурудза є зерновою культурою, яка широко вирощується в усьому світі в різних агроекологічних середовищах. Виробництво кукурудзи вимагає збалансованої взаємодії різних чинників, пов'язаних із генотипом, довкіллям і технологією вирощування культур.

Складові технології вирощування кукурудзи мають важливе значення у формуванні врожаю та якості зерна. Сучасні гібриди кукурудзи вимогливі до їх дотримання. Порушення певних з них, стресові погодні умови значно знижують продуктивність культури [202]. Вважається, що основною передумовою реалізації генетичного потенціалу кукурудзи є достатнє мінеральне живлення рослин [123]. При цьому мінеральне живлення рослин повинно бути оптимізоване. Оптимізація використання мінеральних добрив у системах виробництва кукурудзи є критично важливою для забезпечення прибутковості, продуктивності та екологічної стійкості [405]. Це запобігатиме надлишковому застосуванню добрив, забрудненню довкілля та зниженню економічної ефективності їх застосування. Надмірне внесення добрив стало головною проблемою сталого інтенсивного сільського господарства у світі.

Достатнє мінеральне живлення рослин забезпечується застосуванням добрив, у яких оптимально поєднуються основні та інші елементи живлення з урахуванням агрохімічних показників і властивостей ґрунту та вимог вирощуваних сільськогосподарських культур [55].

Азот має значний вплив на сільськогосподарські культури, проте більшість знань про те, як цей елемент впливає на їх ріст, є емпіричними. Він також підвищує стійкість до біотичного стресу, збільшує накопичення сухої речовини і поглинання поживних речовин, а також збільшує врожайність культур [265]. Максимальна врожайність кукурудзи залежить від



збалансованого живлення, причому азотне живлення є основною поживною речовиною, що обмежує врожайність кукурудзи та якість зерна [31].

Через відсутність знань про взаємозв'язок між поглинанням азоту та врожайністю фермери надлишково вносять азотні добрива, тому не спостерігається залежності між потребою культур в азоті та джерелом азоту. Вищі врожаї зернових є насамперед результатом значних інвестицій у виробництво добрив. Однак надмірне застосування синтетичних добрив погіршує властивості ґрунту і знижує їх ефективність, що призводить до великих втрат азоту та забруднення довкілля [115].

Різні процеси – вимивання, звітрення, ерозія тощо є основною причиною зниження ефективності азоту мінеральних добрив. Тому ключем до підвищення врожаю є краще управління дозою внесеного азоту добрив за допомогою правильних джерел азоту та їх поєднань [221]. Поєднання синтетичного азоту та органічних добрив може знизити витрати на виробництво та екологічні загрози без зниження врожайності [377]. З іншого боку, застосування органічних добрив може зменшити кількість використовуваних синтетичних добрив, одночасно збільшити стійкість та ефективність сільськогосподарської екосистеми упродовж тривалого періоду часу. Біодобрива, складаються з активних клітин різних мікроорганізмів, які колонізують кореневу зону та сприяють росту рослин, що сприяє перетворенню недоступних поживних речовин ґрунту в доступні рослинам форми [353].

Застосування органо-мінеральної системи удобрення кукурудзи дозволяє знизити активність мінералізації гумусу на 17 % і підвищити сумарну біологічну активність на 60 %. Внесення незбалансованих доз мінеральних добрив провокує інтенсифікацію розкладання органічної речовини ґрунту на 43 % і гумусу на 49 %, при цьому коефіцієнти мінералізації азоту та оліготрофності не змінюються, а сумарна біологічна активність зменшується на 8 %, що свідчить про незасвоєння певних кількостей мінеральних елементів [110].

Біогазове виробництво має важливе значення у здоровому та сталому розвитку сільського господарства, що може не тільки поліпшити родючість ґрунту та запобігати його забрудненню, але й збільшувати виробництво продукції [100]. Дигестатом можна замінити або поєднати його з мінеральними добривами в сучасному виробництві, що сприяє економії ресурсів [236] і таким чином пропонує стале технологічне рішення [222].

Проте, дигестат не вирішує всі питання. Його ефективність залежить від вихідного джерела біогазу, агробіологічних особливостей культур і властивостей ґрунтів. Залежно від агрохімічного складу дигестату та потреби сільськогосподарських культур у елементах живлення до нього може бути добавлена певна кількість мінеральних добрив. Це має стимулювальний ефект підвищення ефективності внесеного дигестату та економії ресурсів. Такий комбінований підхід також відіграє важливу роль в оптимізації запасу поживних речовин у ґрунті, збільшенні врожайності та ефективності використання води [419].

Нині дослідження зосереджені на впливі різного поєднання дигестату з мінеральними добривами на продуктивність культур. Вчені зазвичай роблять висновок, що більше дигестату не завжди означає краще. Найкраще поєднання необхідно встановити. Наприклад, найвищу врожайність пшениці озимої було отримано за внесення азоту у вигляді дигестату й мінеральних добрив у відношенні 1 : 1. Як велика, так і мала доза дигестату не сприяла збільшенню врожайності. Такі ж дані були отримані й на інших культурах [406, 312]. Удобрення кукурудзи лише дигестатом зменшувало врожайність зерна [400], а в іншому досліді застосуванню дигестату під кукурудзу сприяло збільшенню вмісту хлорофілу в листках, що підвищувало фотосинтетичну діяльність, сприяло накопиченню сухої речовини у рослині та забезпечувало збільшення врожайності зерна [387]. Є й інші дослідження з капустою білоголовою та пекінською, рисом, кукурудзою та іншими культурами, які показують, що при цьому врожайність не зменшується [220, 375].

У дослідженнях [395] застосування дигестату підвищувало врожайність кукурудзи на 8–10 %. За зрошення кукурудзи дигестатом, що замінював на 50 % мінеральні добрива спряло більш ефективному впливу на врожайність [400], ніж проведення лише зрошення дигестатом.

Порівнянням ефективності дії дигестату та азотних добрив дійшли висновку, що застосування залежно від пропорції впливає на накопичення сухої речовини кукурудзою на силос і на врожайність, а оптимальна доза внесення становила 90 м<sup>3</sup>/га [393].

Застосування супутніх продуктів виробництва біогазу, отриманих ферментацією гною свиней і корів, для удобрення кукурудзи, показало, що вони можуть не тільки збільшували врожай, але й поліпшувати його якість [255].

Дослідження [233] показало, що найбільш сприятливі умови для забезпечення потреб кукурудзи у поживних речовинах були за поєданого внесення дигестату – 60 % і 40 % мінеральних добрив.

Отже, як видно з проведеного огляду результатів проведених досліджень, ефективність дигестату пов'язана з ґрунтово-кліматичними і погодними умовами, видами культур, родючістю ґрунту, дозами його внесення та поєднання з мінеральними добривами, строком і способом застосування тощо.

З урахуванням зростання уваги на використання органічних речовин для удобрення та скорочення внесення промислових хімічних добрив для зменшення впливу клімату, проведене дослідження мало на меті оцінити вплив короточасного внесення дигестату й мінеральних добрив на врожайність та якість зерна кукурудзи. Мета дослідження полягали в тому, щоб мінімізувати вплив забруднення на довкілля, досягти високої ефективності використання азоту та зменшити використання синтетичних азотних добрив. Це дослідження спрямоване на оцінювання впливу дигестату на продуктивність кукурудзи та її складові, за використання з синтетичними азотними добривами у різних поєднаннях.

## **5.1 Вміст хімічних елементів у рослинах кукурудзи залежно від доз внесення дигестату**

Біогазова суспензія є нетрадиційним різновидом органічного добрива з повним вмістом необхідних поживних речовин як швидкої, так і повільної дії [283]. У біореакторах використовуються речовини, що мають органічну структуру. Їх якість, структура та технології можуть впливати на рухомість сполук елементів живлення в ґрунті. Встановлено, що дигестат з гною свиней містить багато калію [416], тоді як додавання гною ВРХ збільшує вміст фосфору [205], інколи в ньому може бути підвищений вміст важких металів [379]. Із загальної кількості азоту мінеральних форм (переважно у вигляді амонійних сполук) складає приблизно  $\frac{1}{2}$ . Це найближчий резерв азоту для засвоєння його кореневою системою рослин. Інша частина азоту знаходиться у вигляді органічних сполук, поступова мінералізація яких пролонгує позитивну меліоративну дію дигестату на ґрунт. Хімічні реакції під час біогазового процесу можуть зменшити рухливість інших макроелементів через утворення фосфатів кальцію й магнію, таких як карбонати, гідроксиапатити і сульфід заліза [425]. На потенційну доступність рослинам важких металів з дигестату впливає якість і структура його органічної речовини, яка залежить від біохімічного складу вихідної сировини і технології її переробки [379]. Дигестат (як органо-мінеральне добриво) може забезпечити рослини такою ж кількістю поживних речовин, як мінеральні [178] або органічні добрива, такі як гній [417].

Дигестат поліпшує поживний режим ґрунту і навіть у високих дозах не підкислює ґрунтовий розчин. На ґрунтах з низьким показником рН внесення дигестату зменшується утворення нерозчинних фосфатів заліза. Він позитивно впливає на засвоєння рослинами фосфору з ґрунтових запасів, є джерелом азоту. Вплив дигестату на динаміку азотного режиму ґрунту більш суттєвий, ніж дія азоту мінеральних добрив. Азот дигестату використовується рослинами краще, ніж азот мінеральних добрив. Дигестат більше впливає на

вміст у ґрунті азоту нітратів, ніж амонію, проте абсолютний вміст нітратів у ґрунті на його тлі нижчий, ніж на тлі мінеральних добрив [188].

Як видно з даних табл. 5.1, у рослинах кукурудзи перед цвітінням (ВВСН 25–27 / V12) була найбільша концентрація азоту й калію – відповідно 3,31–3,88 % і 2,91–4,09% у сухій масі залежно від варіанту дослідів. тобто, у варіанті дослідів Дигестат 50 м<sup>3</sup>/га їх вміст підвищився відповідно на 17 % і 41 % порівняно з контролем. Незначне підвищення вмісту азоту, порівняно з калієм, свідчить про низьку здатність темно-сірого опідзоленого ґрунту дослідної ділянки забезпечувати рослини азотом. Навіть за збільшення дози дигестату з 40 до 50 м<sup>3</sup>/га вміст азоту в рослинах достовірно підвищувався і був надлишковим відповідно до запропонованої шкали [314]. Це ж стосується і забезпеченості рослин фосфором і калієм.

Таблиця 5.1

**Вміст різних доз дигестату на вміст макроелементів у листках  
кукурудзи (2022 р.), % на суху масу**

Варіант дослідів	Макроелемент					
	N	P	K	Mg	Ca	S
ВВСН 25–27 / V12						
Нва <sub>110</sub> (контроль)	3,31	0,83	2,91	0,22	0,48	0,27
Дигестат 20 м <sup>3</sup> /га	3,59	0,85	3,99	0,18	0,42	0,29
Дигестат 30 м <sup>3</sup> /га	3,62	0,87	4,09	0,18	0,43	0,28
Дигестат 40 м <sup>3</sup> /га	3,81	0,81	4,02	0,18	0,43	0,26
Дигестат 50 м <sup>3</sup> /га	3,88	0,80	4,03	0,17	0,42	0,27
<i>НІР</i> <sub>05</sub>	0,18	0,03	0,06	0,03	0,04	0,03
ВВСН 68–70 / R 1						
Нва <sub>110</sub> (контроль)	2,27	0,52	2,18	0,24	0,66	0,18
Дигестат 20 м <sup>3</sup> /га	2,56	0,54	2,83	0,22	0,62	0,20
Дигестат 30 м <sup>3</sup> /га	2,63	0,56	2,91	0,20	0,62	0,21
Дигестат 40 м <sup>3</sup> /га	2,65	0,56	2,90	0,20	0,62	0,22
Дигестат 50 м <sup>3</sup> /га	2,71	0,56	2,88	0,20	0,61	0,22
<i>НІР</i> <sub>05</sub>	0,14	0,03	0,07	0,02	0,04	0,02

Вміст кальцію в рослинах кукурудзи перед цвітінням був більш ніж у два рази вищим, ніж магнію. При цьому необхідно зазначити, що за внесення дигестату спостерігалось достовірне зниження їх вмісту в рослинах – магнію

з 0,22 до 0,18 % на суху масу або на 18 %, а кальцію – з 0,48 до 0,43 % або на 10 %. Відомо, що сумарний відсотковий вміст калію, магнію і кальцію зазвичай постійний на всіх стадіях росту рослин, не дивлячись на те, що можуть бути значні зміни у вмісті окремих елементів живлення [122]. Тому посилення калійного живлення рослин може викликати їх магнієве голодування.

Вміст сірки у рослинах кукурудзи на стадії BBCH 25–27 / V12 був 0,26–0,29 % на суху масу, не залежав від особливостей удобрення і знаходився в оптимальних межах.

На стадії цвітіння кукурудзи (BBCH 68–70 / R 1) концентрація макроелементів у рослинах зменшувалася, проте вищий їх вміст або його зниження у варіантах дослідів були такими ж, як і на попередній стадії розвитку. Так, вміст азоту, порівняно з контролем був вищим на 1319 % залежно від дози внесення дигестату. Підвищення вмісту фосфору в рослинах спостерігалось лише за дози внесення дигестату більш як 30 м<sup>3</sup>/га – на 8 %.

Вміст калію в рослинах кукурудзи підвищувався за всіх доз внесення дигестату на 30–33 %. Як і на попередній стадії розвитку рослин, за високих доз внесення дигестату 30–50 м<sup>3</sup>/га у рослинах знижувався на 20 % вміст магнію, а кальцію достовірно – на 8 % лише за дози внесення дигестату 50 м<sup>3</sup>/га.

Сіркою кукурудза була забезпечена достатньо в усіх варіантах дослідів, хоч і вміст її знижувався порівняно з попереднім строком визначення, був вищим порівняно з неудобреними ділянками за внесення дигестату 30–50 м<sup>3</sup>/га на 17–22 %.

Отже, можна зробити висновок, що кукурудза в досліді не залежно від системи удобрення достатньо забезпечена макроелементами. При цьому необхідно зазначити, що посилене живлення калієм завдяки внесенню дигестату знижує вміст магнію в рослинах до нижньої межі оптимального вмісту – 0,20 мг/кг сухої маси.

Поряд з макроелементами, рослинам необхідні такі мікроелементи як залізо, цинк, бор, манган, мідь. Потреба в них незначна, а в надлишковій кількості вони можуть бути фітотоксичними. Мікроелементи зазвичай є основними речовинами у метаболізмі рослин і можуть бути незамінними складовими ферментативних систем [28].

Кукурудза має значну потребу в забезпеченні цинком і манганом та середню в борі й міді. Під час вегетації вона поглинає з ґрунту для формування 1 т зерна та відповідної кількості стебелиння 23,8 кг азоту, 9,5 –  $P_2O_5$ , 16,8 –  $K_2O$ , 4,9 – Mg, 2,2 – S, 120 г Fe, 40 – Mn, 40 – Zn, 8 – Cu і 7 г B [210].

Як видно з даних табл. 5.2, вміст мікроелементів у рослинах кукурудзи залежав як від фази росту й розвитку рослин, так і від удобрення. Найбільше рослини містили заліза, алюмінію, мангану й цинку. При цьому необхідно зазначити, що концентрація мангану в рослинах у деяких варіантів дослідів була навіть надлишковою – більш як 150 мг/кг сухої маси.

Таблиця 5.2

**Вплив різних доз дигестату на вміст мікроелементів у листках кукурудзи (2022 р.), % на суху масу**

Варіант дослідів	Мікроелемент							
	B	Zn	Mn	Mo	Co	Fe	Al	Cu
BVCH 25–27 / V12								
Нва <sub>110</sub> (контроль)	18,8	30,0	75,9	<0,02	<0,02	208,2	246,2	8,3
Дигестат 20 м <sup>3</sup> /га	19,9	37,1	128,2	<0,02	<0,02	186,2	217,6	8,3
Дигестат 30 м <sup>3</sup> /га	20,2	42,2	132,3	<0,02	<0,02	203,0	218,0	8,4
Дигестат 40 м <sup>3</sup> /га	22,5	50,2	137,3	<0,02	<0,02	216,5	222,3	8,6
Дигестат 50 м <sup>3</sup> /га	22,7	49,9	155,2	<0,02	<0,02	221,8	230,2	9,8
<i>НІР<sub>05</sub></i>	1,4	1,9	12,1	–	–	12,4	14,6	0,5
BVCH 68–70 / R 1								
Нва <sub>110</sub> (контроль)	26,6	40,9	100,3	<0,02	<0,02	89,8	215,9	8,7
Дигестат 20 м <sup>3</sup> /га	27,5	48,9	153,6	<0,02	<0,02	98,1	191,5	8,3
Дигестат 30 м <sup>3</sup> /га	27,8	49,7	134,8	<0,02	<0,02	98,7	195,0	8,4
Дигестат 40 м <sup>3</sup> /га	27,9	49,9	137,4	<0,02	<0,02	115,5	217,2	8,5
Дигестат 50 м <sup>3</sup> /га	27,1	54,8	205,7	<0,02	<0,02	117,5	210,0	8,4
<i>НІР<sub>05</sub></i>	1,5	3,1	20,1	–	–	6,2	23,3	0,5

Вміст заліза в рослинах, хоч і знижувався на період цвітіння кукурудзи у два рази порівняно з попереднім визначенням, але у варіантах досліду з внесенням дигестату був вищим порівняно з контролем на 9–31 % залежно від його дози і знаходився в оптимальних межах – 25–250 мг/кг сухої маси.

За різних строків визначення кукурудза в усіх варіантах досліду була достатньо забезпечена бором і цинком. При цьому внесення дигестату сприяло підвищенню вмісту цинку в рослинах на 8,0–13,9 мг/кг на суху масу за НІР<sub>05</sub> 3,1.

Удобрення дигестатом не мало істотного впливу на вміст міді в рослинах кукурудзи, відмічена навіть незначна тенденція її зниження, але рослини були достатньо забезпечені цим елементом живлення. Вміст молібдену й кобальту за обох строків визначення в рослинах був досить низький – менш як 0,02 мг/кг на суху масу.

На стадії розвитку кукурудзи ВВСН 68–70 / R 1 порівняно з ВВСН 25–27 / V12, за формування більшої біомаси у тканинах рослин, спостерігалось зниження концентрації поживних речовин у тканинах, як макро-, так і мікроелементів, що пояснюється ефектом «ростового розбавлення» (dilution effect) [281]. Це може бути критичним для реалізації генетичного потенціалу гібриду кукурудзи [55].

З проведених досліджень можна зробити висновок, що внесення дигестату навіть у високих дозах (40–50 м<sup>3</sup>/га) не сприяло підвищенню вмісту в надземній частині рослин кукурудзи мікроелементів, а отже немає загрози накопиченню в урожаї зерна важких металів. Відомо, що надходження елементів живлення в рослини лімітує багато чинників [28]. Так, коренева система рослин має розподільну функцію: за надлишку іонів вони затримуються у вакуолях її клітин, а за нестачі – переміщуються з вакуолей у надземні органи. Тобто рослинам характерна вибіркова здатність засвоювати елементи живлення, що пояснюється фізіологічними законами живого організму. Надлишок хімічного елементу, що в нього потрапляє спочатку накопичується в корені, потім у кореневій шийці, стеблі й листках, а потім у



зерні. Таким чином, якщо в надземній вегетативній масі немає надлишку мікроелементів, то й накопичення важких металів у зерні кукурудзи не буде.

**5.2 Продуктивність кукурудзи за різних систем удобрення**

За умов достатнього удобрення та вологозабезпечення кукурудза може формувати високий урожай на всіх ґрунтах [31]. З даних табл. 5.3 видно, що не дивлячись на посушливі умови вегетаційного періоду, системи удобрення сприяли збільшенню врожайності зерна кукурудзи. Так, в умовах 2023 року приріст урожайності становив 3,33–3,53 т/га або 53–56 %, а в 2024 році – відповідно на 1,97–2,48 т/га або 37–47 %. В усі роки проведення досліджень варіанти досліду з різними системами удобрення та внесення азоту добрив у дозі 200 кг/га сприяло достовірному підвищенню врожайності порівняно з контролем. При цьому необхідно зазначити, що в умовах 2024 року варіант досліду Дигестат 10 м<sup>3</sup>/га + Nва забезпечував достовірне збільшення врожайності кукурудзи порівняно з варіантом Дигестат 20 м<sup>3</sup>/га – на 0,41 т/га або на 6 %. Це, на нашу думку, можна пояснити погіршенням умов мінералізації органічних сполук дигестату за посушливих умов вегетаційного періоду.

Таблиця 5.3

**Урожайність кукурудзи залежно від систем удобрення, т/га**

Варіант досліду	Рік проведення дослідження		Середня за два роки	Приріст урожайності до контролю	
	2023	2024		т/га	%
Без добрив (контроль)	6,31	5,29	5,80	—	—
Nва <sub>200</sub>	9,74	7,54	8,64	2,84	49,0
Дигестат 20 м <sup>3</sup> /га	9,63	7,26	8,45	2,65	45,7
Дигестат 15 м <sup>3</sup> /га + Nва	9,75	7,32	8,54	2,74	47,2
Дигестат 10 м <sup>3</sup> /га + Nва	9,84	7,67	8,76	2,96	51,0
<i>НІР</i> <sub>05</sub>	0,58	0,39			

Примітка. Доза внесення азоту за всіх систем удобрення 200 кг/га.

У середньому за два роки проведення досліджень внесення азоту під кукурудзу за різних систем удобрення сприяло збільшенню врожайності зерна на 2,65–2,96 т/га або на 46–51 %. При цьому необхідно зазначити, що у варіанті досліду Дигестат 10 м<sup>3</sup>/га + Nва порівняно з варіантом Дигестат 20 м<sup>3</sup>/га спостерігалась тенденція до збільшення врожайності на 0,31 т/га або на 12 %.

Від збалансованого живлення рослин залежить не лише формування максимального врожаю зерна, але і його якості, причому азотне живлення є основним чинником. Кращі результати дає поліпшення забезпечення рослин азотом упродовж всієї вегетації, ніж одноразове внесення азотних добрив [240].

Проведеними дослідженнями встановлено, що окремі показники якості зерна кукурудзи змінювалися як від удобрення, так і від погодних умов року (табл. 5.4).

Як видно з даних табл. 5.4, натура зерна кукурудзи більше залежала від погодних умов, ніж від системи удобрення. В середньому за два роки проведення досліджень удобрення не впливало на цей показник.

За різних систем удобрення спостерігалось зниження вмісту крохмалю в зерні кукурудзи на 7–8 % залежно від варіанту досліду. Це пояснюється ліпшим забезпеченням рослин азотом, який також сприяв підвищенню вмісту протеїну в зерні на 1,8–2,2 абс. %.

Вміст жиру в зерні кукурудзи від удобрення знижувався з 4,9 до 4,6–4,7 % залежно від варіанту досліду, або на 4–6 %. При цьому вміст клітковини підвищувався на 16–19 %, а золи на 4–6 %.

Отже, застосування дигестату в системі удобрення кукурудзи сприяє формуванню якості зерна на рівні виробничого контролю. При цьому з підвищенням дози його внесення спостерігається тенденція підвищення натури зерна та вмісту в ньому протеїну. Це, на нашу думку, пояснюється кращим живленням рослин азотом та іншими макро- й мікроелементами, особливо азотом у період формування зерна.

Таблиця 5.4

**Якість зерна кукурудзи залежно від систем удобрення**

Варіант досліджу	Нату- ра, г/л	Вміст, % на суху масу				
		крохмалю	протеїну	жиру	клітковини	золи
2023 рік						
Без добрив (контроль)	758	70,2	8,4	6,2	3,3	1,18
Nва <sub>200</sub>	749	60,5	9,1	5,1	3,9	1,26
Дигестат 20 м <sup>3</sup> /га	752	62,1	8,7	5,2	3,8	1,23
Дигестат 15 м <sup>3</sup> /га + Nва	750	61,6	8,9	5,2	3,8	1,24
Дигестат 10 м <sup>3</sup> /га + Nва	750	60,8	9,2	5,1	3,9	1,26
<i>НІР<sub>05</sub></i>	43	3,2	0,5	0,2	0,2	0,04
2024 рік						
Без добрив (контроль)	682	72,1	6,4	3,6	3,0	1,15
Nва <sub>200</sub>	693	71,0	9,7	4,0	3,6	1,22
Дигестат 20 м <sup>3</sup> /га	696	70,6	10,3	4,1	3,5	1,21
Дигестат 15 м <sup>3</sup> /га + Nва	692	70,9	10,1	3,9	3,5	1,22
Дигестат 10 м <sup>3</sup> /га + Nва	690	71,1	10,0	4,0	3,6	1,22
<i>НІР<sub>05</sub></i>	41	3,6	0,6	0,2	0,2	0,03
У середньому за 2023–2024 рр.						
Без добрив (контроль)	720	71,2	7,4	4,9	3,2	1,17
Nва <sub>200</sub>	721	65,8	9,2	4,6	3,7	1,23
Дигестат 20 м <sup>3</sup> /га	724	66,4	9,5	4,7	3,7	1,22
Дигестат 15 м <sup>3</sup> /га + Nва	721	66,3	9,5	4,6	3,7	1,23
Дигестат 10 м <sup>3</sup> /га + Nва	720	66,0	9,6	4,6	3,8	1,24

**5.3 Винесення основних елементів живлення кукурудзою та їх баланс у ґрунті**

Для моніторингу зміни показників родючості ґрунту та розрахунку доз внесення добрив під кукурудзу важливо знати як господарське вилучення

елементів живлення з поля, так і їх засвоєння з ґрунту для формування врожаю надземної маси. При цьому вважають, що коренева система рослин формується завдяки поживним речовинам ґрунту, тому під час розрахунку доз добрив використовують лише показник їх господарського винесення зерном і відповідною кількістю стебелиння [30].

У формуванні врожаю та якості зерна кукурудзи важливе значення має переміщення азоту з вегетативних органів рослин, яке становить 50–90 % [230]. Вважається, що на формування зерна вона використовує 62 % азоту з ґрунту, а 38 % – з вегетативних органів рослин. Найінтенсивніше це процес проходить у кінці вегетації кукурудзи – під час досягання зерна [267]. При цьому кількість переміщеного азоту на ділянках без добрив становила 33 %, а за внесення азотних добрив у дозах 76 і 252 кг/га д. р. – відповідно 20 і 29 %. Встановлено зв'язок між вмістом азоту у вегетативній масі культури та врожайністю. В кукурудзи частка переміщеного азоту не перевищує 45–65 %, тоді як у пшениці та рису сягає 60–95 % [373]. Такі відмінності пов'язані з ємністю вегетативної маси відносно азоту, в першу чергу з більшим вмістом азоту в листках на одиницю площі поля. Тому накопичення азоту надземною біомасою кукурудзи під час цвітіння майже вдвічі менше, ніж пшениці. Це пояснює важливе значення достатнього поглинання азоту кукурудзою після цвітіння для формування врожайності зерна та його якості.

Кукурудза для формування врожаю засвоює з ґрунту значну кількість азоту й калію, трохи менше фосфору (табл. 5.5).

Як видно з даних табл. 5.5, найбільше для формування врожаю кукурудза засвоює азоту – 83,5–183,1 кг/га залежно від варіанту дослідів, а також калію – 99,2–184,0 кг/га. Найменше рослини кукурудзи засвоювали фосфору – 35,5–63,1 кг/га. Тобто основні елементи живлення на ділянках дослідів без удобрення засвоюються у відношенні  $N : P_2O_5 : K_2O$  1 : 0,43 : 1,19. На удобрених ділянках це відношення частково змінюється, наприклад за підживлення дигестатом дозою 20 м<sup>3</sup>/га воно становить 1 : 0,34 : 1,01. Це свідчить про більш економніше використання фосфору й калію з ґрунту для

формування врожаю. Необхідно також зазначити, що за дози дигестату 10 м<sup>3</sup>/га в поєднанні з аміаком водним рослини кукурудзи у середньому за два роки досліджень засвоювали з ґрунту більше азоту на 119 %, фосфору – на 78 і калію на 85 %.

Таблиця 5.5

**Внесення основних елементів живлення з урожаєм кукурудзи за різних систем удобрення (2023–2024 рр.), кг/га**

Варіант досліджу	Винесення					
	зерном			зерном і відповідною кількістю стебелиння		
	N	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	K <sub>2</sub> O	N	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	K <sub>2</sub> O
Без добрив (контроль)	62,6	25,5	20,9	83,5	35,5	99,2
Nва <sub>200</sub>	132,2	42,3	36,3	180,6	62,2	181,4
Дигестат 20 м <sup>3</sup> /га	129,3	41,4	35,5	176,6	60,8	177,5
Дигестат 15 м <sup>3</sup> /га + Nва	130,7	41,8	35,9	178,5	61,5	179,3
Дигестат 10 м <sup>3</sup> /га + Nва	134,0	42,9	36,8	183,1	63,1	184,0

*Примітка.* Доза внесення азоту за всіх систем удобрення 200 кг/га.

У загальному господарському винесенні основних елементів живлення зерном кукурудзи на неудобрених ділянках найбільшу частку складає азот – 73 %, тоді як фосфор і калій – відповідно 68 і 20 %. Це свідчить про те, що з удобрювальними продуктами у ґрунт у першу чергу потрібно повернути винесений азот і фосфор.

Зі стебелинням у ґрунт повертається близько 80 % калію від витраченого на формування надземної маси кукурудзи. Цей калій буде доступний наступним культурам сівозміни.

Як уже зазначалося вище, в методиці проведення досліджень, у зв'язку з дуже високим вмістом у ґрунті дослідних ділянок рухомих сполук фосфору й калію, під кукурудзу вносили лише азот з добривами (200 кг/га) і з дигестатом (10–20 м<sup>3</sup>/га) залежно від варіанту досліджу в ґрунт, крім контрольного варіанту та виробничого контролю, вносилося 97–194 кг/га фосфору (P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>) та 77–154

кг/га ( $K_2O$ ) з урахуванням того, що дигестат з курячого посліду в середньому містив 1,01 % азоту, 0,97 –  $P_2O_5$  і 0,77 %  $K_2O$  на сиру масу.

Для розроблення ефективної системи удобрення в сівозміні та з метою ведення сталого землеробства зазвичай застосовують балансовий метод розрахунку необхідних доз внесення елементів живлення. Основою цього методу є співставлення джерел їх надходження та винесення врожаєм сільськогосподарських культур з ґрунту. Основними чинниками, що впливають на баланс поживних речовин є вміст елементів живлення в зібраному врожаї та кількість їх внесення з удобрювальними продуктами.

Баланс елементів живлення є основою оптимізації системи застосування добрив. Врахування його запобігає надлишковому внесенню елементів живлення та досягається безпечне техногенного навантаження на довкілля. Досягнення формування сталої врожайності кукурудзи потребує формування додатного балансу елементів живлення в ґрунті, що забезпечує оптимальне мінеральне живлення рослин [31]. Розрахунок балансу елементів живлення є зручним і важливим чинником планування використання землі та прогнозування її наслідків [16].

Відомо, що найефективнішою у формуванні поживного режиму ґрунту та додатного балансу поживних речовин і мінерального живлення рослин є орґано-мінеральна система удобрення [46]. Однак у сучасному землеробстві спостерігається значний дефіцит орґанічних добрив, а в структурі балансу елементів живлення основна частка належить мінеральним добривам [92].

Найважливішим складником системи удобрення кукурудзи є азот. Для розрахунку його балансу необхідно враховувати багато джерел надходження в ґрунт, так і непродуктивні втрати. Нині найбільше азоту в ґрунт зазвичай надходить з мінеральними добривами. Це є як основою його балансу, так і сприяє формуванню високої продуктивності сільськогосподарських культур [29].

За результатами одержаних у досліді даних провели розрахунок балансу основних елементів живлення за спрощеною схемою, де було скорочено

кількість однакових і зіставних статей як в частині надходження, так і вилучення. Кількість можливого надходження азоту в ґрунт з насінням, атмосферними опадами, продукується вільноіснуючими азотфіксуючими мікроорганізмами прирівнювали до витрат його звітрюванням, ерозією та вимивання по профілю ґрунту. Вважали що, втрати від ерозії покриваються надходженням з атмосферними опадами і насінням [29]. За такого підходу до розрахунку балансу в частині надходження залишали лише внесення основних елементів живлення з добривами, а вилучення – винесення з урожаєм зерна кукурудзи.

Розрахунки показали, що з урахуванням надходження з добривами і вилучення з поля з урожаєм зерна кукурудзи баланс основних елементів живлення в ґрунті у варіантах досліді змінювався в широких межах – азоту від –62,6 до 72,7 кг/га, фосфору ( $P_2O_5$ ) – від –42,3 до 152,6 кг/га та калію ( $K_2O$ ) від –36,3 до 126,5 кг/га (табл. 5.6).

Таблиця 5.6

**Баланс основних елементів живлення в ґрунті за умови залишення стебелиння на полі та його інтенсивність за різних систем удобрення кукурудзи, 2023–2024 рр.**

Варіант досліді	Баланс, $\pm$ кг/га			Інтенсивність балансу, %		
	N	$P_2O_5$	$K_2O$	N	$P_2O_5$	$K_2O$
Без добрив (контроль)	–62,6	–25,5	–20,9	–	–	–
N <sub>ва200</sub>	69,8	–42,3	–36,3	152,8	–	–
Дигестат 20 м <sup>3</sup> /га	72,7	152,6	126,5	156,2	468,6	456,3
Дигестат 15 м <sup>3</sup> /га + N <sub>ва</sub>	71,3	103,7	85,6	154,6	348,1	338,4
Дигестат 10 м <sup>3</sup> /га + N <sub>ва</sub>	68,0	54,1	44,2	150,7	226,1	220,1

*Примітка.* Доза внесення азоту з добривами за всіх систем удобрення становить 200 кг/га.

За умови збирання з поля лише зерна кукурудзи і залишення стебелиння на добриво, за всіх систем удобрення, що вивчалися в досліді, баланс азоту складався додатним – 68,0–72,7 кг/га, тоді як за фосфором і калієм залежав від

дози внесення дигестату. Вже за дози дигестату  $10 \text{ м}^3/\text{га} + \text{Nва}$  баланс фосфору й калію був додатним відповідно 54,1 кг/га і 44,2 кг/га.

За показника інтенсивності балансу азоту 100–110 % він вважається задовільним, тоді балансу фосфору й калію змінюється з екологічного погляду в більш широкі межі – відповідно 80–280 % і 50–150 % залежно від вмісту їх рухомих сполук у ґрунті [29].

Розрахунки показали, що вже за дози внесення дигестату  $10 \text{ м}^3/\text{га} + \text{Nва}$ , з агрохімічного та екологічного поглядів, найбільш сприятливо складалась інтенсивність балансу основних елементів живлення: азоту – 150,7 %, фосфору – 226,1 і калію – 220,1 %. Це свідчить про поповнення запасів цих елементів живлення в ґрунті.

Інтенсивність балансу азоту була вище рекомендованих значень, але це пояснюється нижчими врожайми, що формувалися за недостатніх умов зволоження в роки проведення досліджень.

За вищих доз внесення дигестату ( $15\text{--}20 \text{ м}^3/\text{га}$ ) у поєднанні з аміаком водним винесення фосфору й калію покривалося в 3,5–4,5 рази. Тому можна зробити висновок, що такі системи удобрення кукурудзи ефективні на ґрунтах з дуже низьким і низьким вмістом рухомих сполук фосфору й калію в ґрунті.

У зв'язку з екологічними проблемами і високою вартістю синтетичних добрив, важливо зменшити непродуктивні втрати поживних речовин і підвищити коефіцієнт їх використання. В ґрунтах чорноземного типу є високі запаси поживних речовин, але використання їх рослинами є невисоким. Тому добрива залишаються найвпливовішими чинниками підвищення врожаїв сільськогосподарських культур. Про значення удобрення в формуванні високих урожаїв кукурудзи свідчать результати досліджень, проведених у різних ґрунтово-кліматичних умовах [37, 44, 93, 103, 130, 146].

Встановлено [40, 88], що на ефективність засвоєння азоту кукурудзою з добрив найбільше впливають доза його внесення, вміст азоту мінеральних сполук у ґрунті та врожайність зерна. Тому для підвищення коефіцієнта використання азоту з добрив доза його внесення повинна забезпечувати



формування запланованого рівня врожайності з мінімальною залишковою кількістю у ґрунті його мінеральних сполук, що запобігатиме непродуктивним втратам і забрудненню довкілля.

За внесення удобрювальних продуктів під кукурудзу важливо знати частку елементів живлення від внесеної кількості, яку ефективно використовують рослини. Розрахунок цих показників різницевим методом у порівнянні з їх винесенням на неудобрених ділянках дослідів є умовним, оскільки не враховується їх використання на формування кореневої системи рослин, а також утворення «екстра-азоту» за додаткового внесення азоту мінеральних сполук. Проте розраховані таким способом коефіцієнти використання елементів живлення рослинами з удобрювальних продуктів дозволяють порівняти варіанти дослідів між собою.

Як видно з даних табл. 5.7, коефіцієнт засвоєння елементів живлення з добрив, розраховані різницевим методом, показують більшу різницю між роками проведення досліджень, ніж варіантами систем удобрення. Так, за однакової дози внесення азоту (200 кг/га), але в різних формах він змінювався від 37,4 % до 56,8 % залежно від погодних умов. У середньому за два роки проведення досліджень коефіцієнт використання азоту був найвищим у варіанті дослідів, де половина азоту з 200 кг/га вносились у вигляді дигестату (10 м<sup>3</sup>/га) – 49,3 %, тоді як з дигестату, внесеного в дозі 20 м<sup>3</sup>/га – знижувався до 46,0 %. Високий коефіцієнт використання азоту з добрив свідчить про значний вплив цього елемента живлення на формування продуктивності кукурудзи.

Коефіцієнт використання рослинами кукурудзи фосфору з дигестату змінювався в широких межах – від 11,7 до 36,6 % залежно від дози його внесення та погодних умов. Зі зменшенням дози внесення дигестату з 20 до 10 м<sup>3</sup>/га коефіцієнт використання фосфору підвищувався в середньому за два роки проведення досліджень з 14,6 до 31,5 %.

Калій у рослинах не утворює складних органічних сполук тому краще використовувався з дигестату – на 38,3–121,9 % залежно від доз його внесення

і погодних умов у період вегетації кукурудзи. Коефіцієнт використання калію 121,9 % у варіанті досліді Дигестат 10 м<sup>3</sup>/га + Nва можна пояснити достатнім забезпеченням рослин азотом і фосфором, що дозволяло додатково, порівняно з неудобреними ділянками, засвоювати його кукурудзою з ґрунту, де були значні запаси його рухомих сполук.

Таблиця 5.7

**Коефіцієнти використання основних елементів живлення кукурудзою за різних видів добрив та їх поєднань, %**

Варіант дослідіу	Рік проведення досліджень		Середнє за два роки
	2023	2024	
Азоту			
Nва <sub>200</sub>	55,8	40,3	48,1
Дигестат 20 м <sup>3</sup> /га	54,7	37,4	46,0
Дигестат 15 м <sup>3</sup> /га + Nва	55,9	38,1	47,0
Дигестат 10 м <sup>3</sup> /га + Nва	56,8	41,6	49,3
Фосфору			
Дигестат 20 м <sup>3</sup> /га	17,5	11,7	14,6
Дигестат 15 м <sup>3</sup> /га + Nва	24,0	15,9	19,9
Дигестат 10 м <sup>3</sup> /га + Nва	36,6	26,4	31,5
Калію			
Дигестат 20 м <sup>3</sup> /га	58,2	38,3	50,7
Дигестат 15 м <sup>3</sup> /га + Nва	79,8	52,0	64,4
Дигестат 10 м <sup>3</sup> /га + Nва	121,9	87,2	98,9

*Примітка.* Доза внесення азоту з добривами за всіх систем удобрення становить 200 кг/га.

#### 5.4 Вплив післядії дигестату на врожайність кукурудзи

Відомо, що традиційні органічні добрива на основі гною тварин мають значну післядію, тоді як пташиний послід є швидкодіючим добривом, що наближається до дії мінеральних добрив [29].

Кукурудзу висівали після кукурудзи, під яку було внесено різні дози дигестату (табл. 5.8). На всій площі досліді, де вносилися добрива під попередник, було внесено аміак водний у дозі 500 кг/га.

Таблиця 5.8

**Урожайність кукурудзи залежно від післядії різних доз дигестату, т/га**

Варіант досліджу	Рік проведення дослідження		Середня за два роки	Приріст урожайності до контролю	
	2023	2024		т/га	%
Нва <sub>100</sub> (контроль)	8,92	6,92	7,92	—	—
Дигестат 20 м <sup>3</sup> /га	9,19	7,03	8,11	0,19	2,4
Дигестат 30 м <sup>3</sup> /га	9,15	7,15	8,15	0,23	2,9
Дигестат 40 м <sup>3</sup> /га	9,19	7,29	8,24	0,32	4,0
Дигестат 50 м <sup>3</sup> /га	9,34	7,42	8,38	0,46	5,8
<i>НІР</i> <sub>05</sub>	0,51	0,40			

Як видно з даних табл. 5.8, залежно від варіанту досліджу врожайність зерна змінювалася від 6,92 до 9,34 т/га залежно від варіанту досліджу та погодних умов, тобто зміни склали 35 %. Це свідчить про значний вплив у першу чергу погодних умов на формування врожаю кукурудзи. В умовах 2023 року дигестат, внесений під попередню кукурудзу, не забезпечував істотного приросту врожаю зерна порівняно з варіантом досліджу з внесенням синтетичних азотних добрив. В умовах 2024 року лише післядія 50 м<sup>3</sup>/га дигестату дала достовірний приріст урожайності зерна – 0,50 т/га або 7,2 %.

У середньому за два роки проведення досліджень за внесення під попередник дигестату в дозі 20–50 м<sup>3</sup>/га приріст урожайності зерна складав 0,19–0,46 т/га або 2,4–5,8 % і збільшувався зі збільшенням дози дигестату.

Отже, з одержаних даних можна зробити висновок, що на темно-сірому лісовому ґрунті з дуже високим вмістом рухомих сполук фосфору й калію спостерігається лише тенденція післядії внесеного дигестату в дозі 20–50 м<sup>3</sup>/га під кукурудзу – на наступній культурі – кукурудзі.

У технології вирощування кукурудзи важливим показником якості врожаю є вологість зерна під час збирання. Він значно впливає на енерговитрат під час доробки зерна до стандартних кондицій. Як показали проведені дослідження, вологість зерна залежить від удобрення (табл. 5.9).

Таблиця 5.9

**Вологість зерна кукурудзи під час збирання залежно від післядії  
різних доз дигестату, %**

Варіант досліджу	Рік проведення дослідження		Середня за два роки	Зміни до контролю, ±	
	2023	2024		абс. %	%
Нва <sub>100</sub> (контроль)	16,6	15,4	16,0	—	—
Дигестат 20 м <sup>3</sup> /га	16,3	15,1	15,7	–0,3	–2
Дигестат 30 м <sup>3</sup> /га	15,5	14,9	15,2	–0,8	–5
Дигестат 40 м <sup>3</sup> /га	15,7	14,8	15,2	–0,8	–5
Дигестат 50 м <sup>3</sup> /га	15,3	14,8	15,1	–0,9	–6
<i>НІР</i> <sub>05</sub>	0,8	0,7			

Як видно з даних табл. 5.9, післядія дигестату в 2023 році сприяла пришвидшенню досягання зерна кукурудзи, що знижувало його вологість. Так, за дози внесення дигестату 30–50 м<sup>3</sup>/га спостерігалось достовірне зниження вологості зерна на 0,9–1,3 абс. % за НІР<sub>05</sub> 0,8 %. Це можна пояснити кращим збалансованим мінеральним живленням рослин, порівняно з контролем та з варіантом досліджу Дигестат 20 м<sup>3</sup>/га.

У більш посушливих умовах 2024 року за варіантами досліджу не було виявлено істотної різниці – вологість зерна кукурудзи була в межах 14,8–15,1 % за НІР<sub>05</sub> 0,7 %.

У середньому за два роки проведення досліджень зі збільшенням дози внесення дигестату під попередник до 30–50 м<sup>3</sup>/га спостерігалась тенденція зниження вологості зерна кукурудзи під час збирання на 5–6 %.

### **Висновки до розділу 5**

Встановлено, що застосування дигестату в системі удобрення кукурудзи має значний вплив на засвоєння елементів живлення рослинами і формування врожаю зерна та його якості й виявляється в наступному:

1. Кукурудза на дослідних ділянках перед і в період цвітіння (стадії V 12 і R-1) була достатньо забезпечена макроелементами відповідно до прийнятої шкали. При цьому необхідно зазначити, що за внесення високих доз дигестату (30–50 м<sup>3</sup>/га) посилюється накопичення в рослинах калію, що знижує вміст у них магнію до нижньої межі оптимального вмісту – 20 мг/кг сухої маси.

2. Внесення дигестату, навіть у високих дозах – 40 і 50 м<sup>3</sup>/га, не сприяло значному підвищенню вмісту в рослинах кукурудзи мікроелементів. Їх вміст був в оптимальних межах, а отже, немає загрози накопичення в зерні важких металів.

3. Урожайність кукурудзи залежить як від погодних умов, так і від систем удобрення. За різних систем удобрення врожайність зерна збільшується на 2,65–2,96 т/га або на 46–51 % за врожайності на контролі без добрив 5,80 т/га. За внесення 10 м<sup>3</sup>/га дигестату в поєднанні з аміаком водним спостерігається тенденція збільшення врожайності на 0,31 т/га або на 12 % порівняно з внесенням лише дигестату в дозі 20 м<sup>3</sup>/га.

4. Внесення під кукурудзу дигестату в дозі 20 м<sup>3</sup>/га порівняно з виробничим контролем (Nва<sub>200</sub>) істотно не змінює показників якості зерна. При цьому спостерігається тенденція поліпшення натури зерна та вмісту в ньому протеїну.

5. З урожаєм зерна кукурудза виносить на удобрених ділянках 73 % азоту, 68 – фосфору та 20 % калію від їх засвоєння для формування врожаю (господарське винесення зерном і відповідної кількості стебелиння).

6. Найбільш сприятливо баланс азоту, фосфору та калію в ґрунті за умови видалення з поля лише зерна кукурудзи – відповідно 68,0 кг/га, 54,1 і 44,2 кг/га складається за системи удобрення Дигестат 10 м<sup>3</sup>/га + Nва і загальної дози азоту 200 кг/га.

7. Коефіцієнт використання основних елементів живлення з удобрювальних продуктів залежить від поєднання в системі удобрення азоту дигестату та аміаку водного та був найбільшим у середньому за два роки

проведення досліджень у варіанті досліду Дигестат 10 м<sup>3</sup>/га + Nва – азоту 49,3 %, фосфору – 31,5 і калію 98,9 %.

8. На темно-сірому лісовому ґрунті з дуже високим вмістом рухомих сполук фосфору й калію спостерігається лише тенденція післядії внесеного дигестату в дозі 20–50 м<sup>3</sup>/га під кукурудзу – на наступній культурі – кукурудзі.

9. Зі збільшенням дози внесення дигестату під попередник до 30–50 м<sup>3</sup>/га спостерігалась тенденція зниження вологості зерна кукурудзи під час збирання на 5–6 %.

Основні положення цього розділу викладені в таких наукових працях автора зі списку використаних джерел [41, 179, 180, 186].

## **РОЗДІЛ 6**

### **АГРОХІМІЧНЕ, ЕКОНОМІЧНЕ ТА ЕНЕРГЕТИЧНЕ ОЦІНЮВАННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ЗАСТОСУВАННЯ ДИГЕСТАТУ ДЛЯ УДОБРЕННЯ**

Основними економічними системами у сучасному світі є економіка замкнутого циклу та сталий розвиток. Їх основна мета – раціональне використання природних ресурсів з глибокою переробкою матеріалів і відходів на корисні продукти. Це сприятиме поліпшенню умов довкілля та залученням відходів у різні технології, що сприятиме зменшенню їх кількості. У свою чергу, це зменшить використання природних ресурсів [362] і відповідатиме циркулярній економіці, яка спрямована на зменшення утворення відходів [386].

Основною метою сучасного товарного виробництва та підвищення його економічної ефективності залежить від двох його складових: зменшення поточної і уречевленої праці на одиницю створеної продукції і реалізація її за цінами, що покривають витрати. Тому основним завданням агрономічних досліджень, що стосуються вирощування сільськогосподарської продукції і відновлення родючості ґрунту є зменшення її собівартості і підвищення окупності витрат з метою конкуренції в умовах ринкової економіки.

Прибуток є одним з ключових економічних категорій, який визначає ефективність господарської діяльності підприємства та його здатність до подальшого розвитку й існування в економічно позитивному сенсі. Для підприємств у сфері відновлюваної енергетики, які діють у специфічних умовах регулювання, прибуток стає не лише джерелом інвестицій у модернізацію технологій, а й індикатором успішності функціонування з огляду на високі вимоги щодо регулювання ринку енергетики в Україні.

Підвищення ефективності вирощування сільськогосподарських культур у зазвичай відбувається завдяки додатковим вкладенням антропогенної енергії,

яка матеріалізується у різному вигляді (нові сортів, форм добрив і способів їх застосування. Особливо великі витрати на виробництво та застосування мінеральних добрив, тому вирішення питання зменшення їх доз є одним з основних важелів підвищення ефективності рослинництва.

Ефективність систем удобрення окремих сільськогосподарських культур оцінюють за агрохімічними, економічними та енергетичними показниками. Поряд з цим, враховують і екологічні проблеми, що виникають при застосуванні удобрювальних продуктів [30].

Проблема ефективної переробки і утилізації відходів є однією з найгостріших. Вирішення її можливе впровадженням ефективних заходів безпечної їх переробки і отриманню економічного й екологічного ефекту від утилізації і багаторазового використання сировини. Однак основний негатив від використання біологічних відходів на біопаливо лежить в екологічній площині, оскільки це призводить до деградації земель і втрати їх родючості. Тому зростання кількості біовідходів потребує розробки способів ефективного ними управління, заснованого на процесах, які безпечніші для довкілля, ніж спалювання чи компостування [43].

Ефективність добрив зазвичай оцінюють за отриманим урожаєм, його збільшенням і якістю та понесених додаткових витратах. Мінеральні промислові добрива відрізняються ефективністю і зручністю застосування. З їх подорожчанням актуальним стає застосування інших удобрювальних продуктів і заходів з поліпшення властивостей ґрунту. Внесення органічних добрив є стабільною сільськогосподарською практикою, яка може забезпечити продовольством населення та одночасно зменшити негативний вплив на довкілля [7, 116, 188].

Сільськогосподарські, тваринницькі, промислові та харчові відходи є добрим субстратом для виробництва чистої та сталої енергії у контексті циркулярної економіки. Їх перетворення в біогаз і біометан анаеробним зброджуванням є ефективним рішенням для переробки відходів різного походження [5]. Незалежно від того, тверді чи рідкі супутні продукти їх



виробництва – дигестат, його можна використовувати як високоефективне добриво. Дигестати ефективно заповнюють нішу в доступності дешевших високоякісних добрив [366]. Біодобрива можуть замінити 5–7 % мінеральних добрив, які нині використовуються у світовому землеробстві. Ця зміна сприятиме більш стійкому та екологічному підходу до сільськогосподарського виробництва, що зменшить вплив на довкілля, пов'язаний з виробництвом і застосуванням мінеральних добрив.

Оцінювання ефективності застосування різних форм органічних добрив має свої особливості, які проводять різними способами [30]. За внутрішнього використання в господарстві у вартість дигестату можуть враховуватися лише витрати на його зберігання, транспортування та застосування. Вартість дигестату також можна розраховувати за приростом урожайності сільськогосподарських культур від його застосування. Можна прирівняти у зіставних цінах вартість елементів живлення, що містяться в дигестаті та в промислових мінеральних добривах. Але при цьому не враховується, що дигестат є комплексним удобрювальним продуктом – добривом, агрономеліорантом і біопрепаратом.

## **6.1 Агрохімічна ефективність**

Застосування інтенсивних технологій вирощування сільськогосподарських культур змушує до збільшення витрат на виробництво й застосування добрив. Складність розрахунку економічної ефективності полягає у диспараті ціні на добрива та продукцію рослинництва, нові їх форми, реакції різних сортів і гібридів на удобрення, різні ґрунтово-кліматичні та погодні умови зумовлюють необхідність визначення межі економічної доцільності застосування добрив у конкретних умовах господарювання [30]. При цьому необхідно встановити мінімально необхідний приріст урожаю від добрив, що покривають витрати на їх застосування, а також ціну на одиницю добрив за якої вона покривається приростом урожаю.

Поряд з отриманням максимально чистого прибутку, необхідно забезпечити додатний баланс елементів живлення в межах екологічно допустимої межі його інтенсивності з метою підвищення його родючості ґрунту. Особливості це стосується фосфору, в меншій мірі калію. Баланс азоту також може бути додатним з інтенсивністю 110 % на ґрунтах з дуже низьким і низьким його вмістом [30].

Розрахунки показали, що підживлення пшениці озимої різними дозами дигестату мали значний вплив на його витрати на формування 1 т приросту врожаю зерна (табл. 6.1).

Таблиця 6.1

**Агрохімічна ефективність підживлення пшениці озимої дигестатом,  
у середньому за 2022–2023 рр.**

Варіант досліджу	Витрати добрив на формування 1 т приросту врожаю зерна, кг д. р. або м <sup>3</sup>	Окупність 1 кг д. р. або 1 м <sup>3</sup> добрив, кг зерна
Азотні добрива (N <sub>109</sub> )	44,1	22,7
Дигестат 10 м <sup>3</sup> /га	4,6	216,0
Дигестат 20 м <sup>3</sup> /га	15,2	66,0
Дигестат 30 м <sup>3</sup> /га	50,0	20,0

Як видно з даних табл. 6.1, найменші витрати дигестату на формування 1 тонни зерна пшениці озимої (4,6 м<sup>3</sup>) були у варіантах досліджу з внесенням його в дозі 10 м<sup>3</sup>/га. У варіанті досліджу, з дозою внесення дигестату 20 м<sup>3</sup>/га, вони зростали на 15,2 м<sup>3</sup>/т зерна, або більш, ніж у три рази. Витрати азоту синтетичних добрив на формування 1 т приросту врожаю зерна, порівняно з азотом дигестату за дози його внесення 10 м<sup>3</sup>/га дещо зростали і становили 50,9 кг (за умови вмісту азоту в дигестаті 1,1 %).

Важливим показником, з агрохімічного погляду, є окупність 1 т дигестату приростом урожаю зерна. Встановлено, що за підживлення пшениці озимої дозою 10 м<sup>3</sup>/га він у 10 разів вищий, ніж за підживлення дозою 30 м<sup>3</sup>/га – відповідно 20,0 і 216,0 кг зерна на 1 т дигестату.

Агрохімічна ефективність застосування дигестату в системі удобрення кукурудзи залежить від співвідношення його внесення з аміаком водним за однієї дози внесення азоту (табл. 6.2).

Таблиця 6.2

**Агрохімічна ефективність внесення дигестату під кукурудзу,  
у середньому за 2023–2024 рр.**

Варіант досліджу	Витрати азоту добрив на формування 1 т приросту врожаю зерна, кг	Окупність 1 кг азоту добрив, кг зерна
Nва <sub>200</sub>	70,4	14,2
Дигестат 20 м <sup>3</sup> /га	75,5	13,3
Дигестат 15 м <sup>3</sup> /га + Nва	73,0	13,7
Дигестат 10 м <sup>3</sup> /га + Nва	67,6	14,8

Як видно з даних табл. 6.2, витрати азоту добрив на формування 1 т приросту врожаю зерна кукурудзи були найменшими за внесення дигестату в поєднанні в системі удобрення з азотом аміаку водного у відношенні 1 : 1 – 67,7 кг або на 4 % менше порівняно з виробничим контролем (Nва<sub>200</sub>). За удобрення кукурудзи лише дигестатом витрати азоту на формування 1 т приросту врожаю зерна кукурудзи збільшувалися відповідно на 5,1 кг або на 7 %.

Окупність 1 кг азоту добрив за однієї дози його внесення – 200 кг/га у різних поєднаннях з аміаком водним змінювалась в середньому за роки проведення досліджень у межах 13,3–14,8 кг зерна. Найбільшою вона була за внесення азоту дигестату та аміаку водного у відношенні 1 : 1, або на 11 % порівняно з внесенням азоту лише у вигляді дигестату в дозі 20 м<sup>3</sup>/га.

Отже, агрохімічна ефективність застосування дигестату для удобрення сільськогосподарських культур залежить як від доз його внесення, так і від поєднання в системі удобрення з азотом синтетичних добрив.

## 6.2 Економічна ефективність

У технології вирощування сільськогосподарських культур значну частку матеріальних і трудових витрат займає застосування мінеральних добрив. За нинішніх умов господарювання низка вчених і товаровиробників рекомендують зменшити застосування мінеральних добрив. Є навіть поради повністю виключити їх з технології вирощування певних культур. Проте такі рекомендації потребують ретельного вивчення впливу на якість ґрунту та продуктивність сільськогосподарських культур у певних ґрунтово-кліматичних умовах [3, 8, 20, 175].

Для розрахунку витрат, пов'язаних із застосуванням мінеральних добрив, враховували прямі витрати (вартість добрив, витрати на їх внесення), а також пропорційно розподілені при калькуляції собівартості продукції за прямими витратами. Розрахунки проведено за фактичними витратами і отриманою врожайністю сільськогосподарських культур відповідно до вартості мінеральних добрив та послуг і зерно за цінами IV кварталу 2025 року.

Вартість 1 т зерна пшениці озимої і кукурудзи за вирощування на неудобрених ділянках приймали відповідно за 9700 і 7600 грн. Вартість 1 т удобрювальних продуктів становила, грн: аміачної селітри 20,7 тис., аміаку водного – 12,2 тис. Вартість застосування дигестату залежала від його собівартості, відстані перевезення від заводу та внесення й становила від 38 грн/м<sup>3</sup> (за відстані до 5 км) до 373 грн/м<sup>3</sup> (за відстані 56 км). У проведених розрахунках приймали, що дигестат перевозили на відстань 56 км.

За такого паритету цін на удобрювальні продукти і зерно економічна ефективність змінювалась залежно від системи удобрення пшениці озимої і кукурудзи (табл. 6.3). Як видно з даних табл. 6.3, вартість приросту врожаю зерна пшениці озимої сильно залежала від дози внесення дигестату і була в межах 5,8 тис.–21,0 тис. грн/га та поступалась за цим показником варіанту досліду з внесенням азотних добрив у дозі 109 кг/га д. р. Витрати, пов'язані із застосуванням добрив порівняно з вартістю приросту врожаю були вищими

лише за дози дигестату 30 м<sup>3</sup>/га та перевезення його на відстань 56 км від біогазової установки. При цьому необхідно зазначити, що витрати на застосування 10 м<sup>3</sup>/га дигестату були на 3,5 тис. грн/га меншими, ніж за традиційної системи удобрення азотними добривами дозою 109 кг/га д. р. Це у свою чергу сприяло збільшенню додаткового умовно чистого прибутку з 1 га на 500 грн. Підвищення дози внесення дигестату до 20 м<sup>3</sup>/га знижувало цей показник на 10,9 тис. грн/га, а за дози 30 м<sup>3</sup>/га – було одержано збиток у розмірі 5,6 тис. грн/га. Перш за все це пов'язано зі значними витратами на транспортування дигестату від заводу до поля.

Перевезення дигестату на відстань до 56 км від заводу та застосування для ранньовесняного підживлення пшениці озимої дозою 20 м<sup>3</sup>/га було рентабельним за умовно чистим прибутком. За дози внесення дигестату 10 м<sup>3</sup>/га цей показник підвищувався на 173 % за показника у варіанті досліді Азотні добрива (N<sub>109</sub>) 204 %.

Окупність 1 грн витрат на застосування удобрювальних продуктів змінювалась у межах 0,5–4,8 грн і була найвищою у варіанті досліді з підживлення пшениці озимої дигестатом дозою 10 м<sup>3</sup>/га.

Отже, з економічного погляду ранньовесняне підживлення пшениці озимої дигестатом у дозі 10 м<sup>3</sup>/га навіть за перевезення від заводу до поля на відстань до 56 км є ефективнішим. Порівняно з традиційною системою її підживлення синтетичними азотними добривами (аміачною селітрою та КАС-32) дозою 109 кг/га д. р.

Розрахунки економічної ефективності застосування дигестату в системі удобрення кукурудзи показали доцільність проведення цього заходу як окремо, так і в поєднанні з аміаком водним (див. табл. 6.3). Як видно з даних табл. 6.3, за дози внесення під кукурудзу удобрювальних продуктів з розрахунку 200 кг/га азоту вартість приросту врожаю зерна змінювалась неістотно – від 20,1 тис. до 22,5 тис. грн/га і була найвищою за внесення 10 м<sup>3</sup>/га дигестату та додаткового внесення аміаку водного, тобто у відношенні їх за азотом як 1 : 1.

Таблиця 6.3

**Економічна ефективність застосування дигестату під пшеницю озиму й кукурудзу**

Варіант дослідю	Вартість приросту врожаю, тис. грн/га	Витрати, пов'язані із застосуванням добрив, тис. грн/га			Додатково умовно чистий прибуток / збиток, грн/га	Рівень рентабельності/ збитковості за умовно чистим прибутком, %	Окупність витрат на застосування добрива
		Всього	в тому числі				
			вартість добрив	навантаження, перевезення, внесення добрив і дороблення приросту врожаю			
Пшениця озима							
Азотні добрива (N <sub>109</sub> )	24,0	7,9	6,6	1,3	16,1	204	3,0
Дигестат 10 м³/га	21,0	4,4	—	0,7 <sup>1</sup>	16,6	377	4,8
Дигестат 20 м³/га	12,8	7,9	—	0,4 <sup>1</sup>	4,9	62	1,6
Дигестат 30 м³/га	5,8	11,4	—	0,2 <sup>1</sup>	−5,6	−49	0,5
Кукурудза							
N <sub>ва200</sub>	21,6	14,6	12,2	2,4	7,0	48	1,5
Дигестат 20 м³/га	20,1	8,0	—	0,5 <sup>1</sup>	12,1	151	2,5
Дигестат 15 м³/га + N <sub>ва</sub>	20,8	9,4	—	0,7 <sup>2</sup>	11,4	121	2,2
Дигестат 10 м³/га + N <sub>ва</sub>	22,5	11,8	—	1,9 <sup>2</sup>	10,7	91	1,9

*Примітки:* 1 – витрати, пов'язані із дороблення приросту врожаю від дигестату, тис. грн/га; 2 – витрати, пов'язані із навантаження, перевезення, внесення аміаку водного і дороблення приросту врожаю від добрив, тис. грн/га.

Збільшення дози азоту дигестату за дози його внесення 15 м<sup>3</sup>/га відповідно знижувало вартість приросту врожаю зерна кукурудзи на 1,7 тис. грн/га.

Витрати, пов'язані із застосуванням удобрювальних продуктів під кукурудзу були найменшими (8,0 тис. грн/га) у варіанті досліді із внесенням лише 20 м<sup>3</sup>/га дигестату, а найбільшими, на 83 %, за внесення аміаку водного у дозі 200 кг/га д. р. Це вплинуло на формування умовно чистого прибутку який становив 7,0 тис.–12,1 тис. грн/га і також був найвищим за внесення дигестату у дозі 20 м<sup>3</sup>/га. При цьому необхідно зазначити, що цей показник дещо знижувався – до 10,7 тис.–11,4 тис грн./га за заміни у системі удобрення кукурудзи частини азоту дигестату азотом мінеральних добрив.

Всі системи застосування удобрювальних продуктів, що вивчалися в досліді, були рентабельними за умовно чистим прибутком. За цим показником традиційна система удобрення кукурудзи азотом значно поступалася де системам, застосовувався дигестат – 48 % проти 91–151 %.

Окупність 1 грн витрат на застосування удобрювальних продуктів під кукурудзу складала 1,5–2,5 грн і була найвищою за внесення лише дигестату у дозі 20 м<sup>3</sup>/га.

Отже, застосування дигестату в системі удобрення пшениці озимої і кукурудзи є економічно виправданим і може замінити дороговартісні синтетичні азотні добрива. При цьому необхідно врахувати перш за все витрати на транспортування дигестату від заводу до поля.

### **6.3 Енергетична ефективність**

Постійне зростання цін на енергоносії і матеріали для енергонасичення технологій збільшує втратну частину аграрного виробництва, що спонукає проведення досліджень і запровадження в агропромисловому комплексі поряд з агрохімічним і економічним, енергетичного аналізу.

У проведених розрахунках у енерговитрати на застосування синтетичних азотних добрив враховували витрати на їх виготовлення, доставку зі складу в господарство на відстань 20 км (22 МДж на 1 т/км), на зберігання в складі господарства – 38,8 МДж/т. Енерговитрати на підготовку, навантаження перевезення та внесення азотних синтетичних добрив розраховували за такою формулою:

$$E_v = 171,4 + 81D + 1,3R + 23DR - 1,6R^2,$$

де  $D$  – фізична маса добрива на 1 га, т;

$R$  – відстань перевезення добрив до поля зі складу господарства (5 км).

Дигестат за кількістю енергії оцінювали з розрахунку 0,42 МДж/кг вмісту основних елементів живлення. Енергетичні витрати на його навантаження, транспортування на відстань 5 км і внесення за перевальною технологією становили 5,39 ГДж за дози 20 м<sup>3</sup>/га [30]. Такий аналіз дозволяє додатково оцінити можливість економії ресурсів та енергії (табл. 6.4).

Таблиця 6.4

**Енергетична ефективність застосування дигестату під пшеницю озиму й кукурудзу**

Варіант досліджу	Енергоємність, ГДж/га		Чистий енергетич ний прибуток, ГДж/га	K <sub>се</sub>	Енергетична собівартість, ГДж/т зерна
	приросту врожаю зерна	застосув ання добрив			
Пшениця озима, у середньому за 2022–2023 рр.					
Азотні добрива (N <sub>109</sub> )	40,63	9,83	30,80	3,1	3,98
Дигестат 10 м <sup>3</sup> /га	35,53	5,18	30,35	5,9	4,55
Дигестат 20 м <sup>3</sup> /га	21,71	5,62	16,09	2,9	3,92
Дигестат 30 м <sup>3</sup> /га	9,87	8,23	1,64	0,2	13,70
Кукурудза, у середньому за 2023–2024 рр.					
N <sub>ва200</sub>	43,00	18,14	24,86	1,4	6,39
Дигестат 20 м <sup>3</sup> /га	40,12	5,62	34,50	6,1	2,12
Дигестат 15 м <sup>3</sup> /га + N <sub>ва</sub>	41,48	5,14	36,34	7,1	1,88
Дигестат 10 м <sup>3</sup> /га + N <sub>ва</sub>	44,81	10,77	34,04	3,2	3,64

Розрахунки показали, що енергоємність приросту врожаю зерна пшениці озимої в усіх варіантах досліджу була вищою, ніж енерговитрати на



застосування азотних синтетичних добрив і дигестату. При цьому, залежно від системи удобрення, чистий енергетичний прибуток змінювався від 1,64 ГДж/га (у варіанті Дигестат 30 м<sup>3</sup>/га) до 30,80 ГДж/га – за традиційного внесення синтетичних азотних добрив (N<sub>109</sub>). За підживлення пшениці озимої дигестатом дозою 10 м<sup>3</sup>/га чистий енергетичний прибуток становив 30,35 ГДж/га, або 99 % від виробничого контролю (Азотні добрива (N<sub>109</sub>)). За підвищення дози дигестату до 30 м<sup>3</sup>/га чистий енергетичний прибуток наближався до нуля і становив лише 5 % від виробничого контролю.

Коефіцієнт енергетичної ефективності (К<sub>е</sub>), як відношення чистого енергетичного прибутку до енерговитрат, у варіантах дослідів змінювався в широких межах – від 0,2 до 5,9 і був найвищим у варіанті дослідів з підживленням пшениці озимої дигестатом дозою 10 м<sup>3</sup>/га. За внесення дигестату 30 м<sup>3</sup>/га цей показник був лише 0,2.

Енергетична собівартість зерна пшениці озимої залежно від системи удобрення була 3,92–13,7 ГДж/т. Підвищення дози дигестату з 10–20 до 30 м<sup>3</sup>/га значно підвищували енерговитрати на одиницю приросту врожаю. Так, порівняно з традиційною системою застосування азотних добрив це збільшення становило 9,72 ГДж/т, тоді як від внесення 20 м<sup>3</sup>/га – вона була найнижчою – 3,92 ГДж/т.

За удобрення кукурудзи дигестатом як окремо, так і у різному поєднанні з аміаком водним загальною дозою азоту 200 кг/га енергетична ємність приросту врожаю зерна змінювалася в межах 93–104 % від виробничого контролю (N<sub>ва200</sub>) (див. табл. 6.4). Найвищою вона була у варіанті дослідів Дигестат 10 м<sup>3</sup>/га + N<sub>ва</sub> і відношенні доз їх азоту 1 : 1.

Енергетичні витрати на застосування дигестату у різному поєднанні з аміаком водним становили 28–59 % від виробничого контролю (N<sub>ва200</sub>) і були найнижчими у варіанті дослідів Дигестат 15 м<sup>3</sup>/га + N<sub>ва</sub> за внесення 75 % азоту у вигляді дигестату та 25 % – аміаку водного.

Чистий енергетичний прибуток у варіантах дослід з внесенням дигестату був вищим порівняно з виробничим контролем ( $N_{ва200}$ ) на 37–46 % залежно від частки азоту аміаку водного в загальній дозі його внесення (200 кг/га).

Застосування дигестату в системі удобрення кукурудзи сприяло підвищенню коефіцієнта енергетичної ефективності з 1,4 до 3,2–7,1.

Енергетична собівартість 1 т зерна кукурудзи залежала від системи застосування добрив і знижувалась за умови заміни частини азоту аміаку водного на дигестат з 6,39 ГДж до 1,88–3,64 ГДж. Найнижчий показник її був за умови заміни 75 % азоту в системі удобрення на азот дигестату.

Проведені дослідження підтверджують високу енергетичну ефективність дигестату. Високі значення коефіцієнта енергоефективності були також і в інших дослідках у варіантах поєданого застосування мінеральних добрив ( $N_{90}P_{90}K_{90}$ ) та біоорганічного добрива на основі «Флюент» (55,0 т/га) під кукурудзу (3,05–3,07), моркву (1,41–1,45) і буряк столовий (1,97–2,00), але витрати у цих варіантах були найвищими [313].

#### **6.4 Перспективи застосування дигестату в сучасних агротехнологіях**

Перспективність застосування дигестату полягає в тому, що значна частина органічних відходів припадає саме на агропромисловий комплекс, тому розвиток біогазової енергетики є найбільш перспективним саме в цьому секторі економіки.

Висока щільність худоби і птиці, широке поширення промислових методів їх утримання обумовлює накопичення нетоварних продуктів виробництва в екологічно небезпечних масштабах. У зв'язку з цим за інтенсивного сільськогосподарського виробництва поряд з розробкою технологій ефективного застосування органічних добрив постають питання охорони довкілля. У першу чергу це відноситься до зберігання, переробки і застосування рідких органічних добрив.

У формуванні продовольчої безпеки населення України та експортного потенціалу значну частку займає галузь птахівництва, яка є однією з найбільш економічно привабливих і конкурентоспроможних. Про це свідчить стала динаміка зростання виробництва м'яса птиці та яєць. Збільшення виробництва птиці з одного боку інтенсифікує виробництво, а з іншого – сприяє накопиченню супутніх продуктів. Одним із пріоритетних напрямів вирішення проблеми супутніх продуктів у птахівництві є переробка пташиного посліду ферментативним бродінням. Це дає додатковий енергетичний продукт і органо-мінеральне добриво.

Послід без належної переробки втрачає поживні речовини, стає джерелом токсикантів і негативно впливає прилеглі до птахокомплексів екосистеми. Екологічна мета технології його переробки – запобігання територіально обмеженому накопиченню та створенню передумов для можливості транспортування і розосередження перероблених речовин. Екологічними показниками негативного впливу при цьому є: зміна місцевої навколишньої екологічної ситуації за накопичення в одному місці та умов проживання людей; забруднення ґрунту й повітря, що прямо чи опосередковано змінює їх склад, а також флору і фауну в безпосередній близькості до підприємств; висока ймовірність забруднення природних водойм [136].

У сучасних складних економічних умовах обґрунтування раціонального застосування супутніх продуктів біогазового виробництва є актуальним. Супутні продукти біогазового виробництва, зокрема з відходів птахівництва, можуть займати важливе місце серед нетрадиційних видів органічних удобрювальних продуктів. Через зростання витрат на виробництво традиційних органічних і неорганічних добрив, підвищення екологічних зборів, необхідно розробити і удосконалити сучасні агротехнології, які включають валоризацію відходів. Нині в Україні методи утилізації відходів постійно оновлюються відповідно до європейських стандартів. Вибір ефективної системи їх утилізації має враховувати детальний аналіз у межах кожного природно-кліматичного регіону. Тому важливе значення має

оцінювання агрохімічної ефективності супутніх продуктів виробництва біогазу з таких поглядів: перш за все їх потрібно десь подіти, вони можуть позитивно впливати на агрофізичні та біологічні властивості ґрунту, а також діяти як удобрювальні продукти. Відповідно робочої гіпотези у процесі проведення досліджень набули подальшого розвитку підходи до управління процесами утилізації супутніх продуктів виробництва біогазу, що сприятиме розвитку біоенергетики в Україні та поліпшенню екологічної та економічної ситуації у регіоні.

Рівень застосування промислових мінеральних добрив в Україні залишається низьким, вартість їх висока, а якість ґрунту від їх тривалого нераціонального внесення погіршується. Останні розрахунки економічної ефективності застосування мінеральних добрив показали, що у зв'язку зі значним ростом цін на продукцію хімічної промисловості їх закупівля господарствами стала менш вигідною [32, 35]. Значний диспаритет цін змушує аграріїв до пошуку альтернативних джерел створення необхідного поживного режиму ґрунту. Одним з них є нетрадиційні органічні добрива, на які до цього більшість сільськогосподарських підприємств не звертали належної уваги.

Через необхідність зменшення шкідливого впливу сільського господарства на довкілля, використання менш інтенсивних методів виробництва нині є одним із пріоритетів сільськогосподарської політики Європейського Союзу (European Green Deal), яка рекомендує економне використання мінеральних добрив і пестицидів та є основою для створення нових технологій. Кількість та інтенсивність використання азоту з різних органічних джерел мають значний вплив на живлення та продуктивність сільськогосподарських культур [11] і родючість ґрунту [34, 212].

Сучасна невідповідність інтенсивних технологій екологічній парадигмі, призводить до негативних екологічних, економічних і соціальних наслідків (енергетична криза, деградація екосистем, зниження якості сільськогосподарської продукції, забруднення довкілля). Отримання органічних добрив з супутньої продукції галузі тваринництва є актуальним

напрямом, який поліпшує екологічний стан довкілля. Цей підхід має три аспекти: використання мікроорганізмів, які природно присутні в супутній продукції тваринного походження або добавлені штучно; зменшення біологічної потреби у кисні; вивільнення поживних речовин [203].

Застосування дигестату в сільськогосподарському виробництві має як позитивний, так і негативний вплив на довкілля [341]. Згідно з вимогами ЄС у розвитку галузі тваринництва необхідно дотримуватися балансу між нарощуванням виробництва продукції і утилізацією відходів. Тому виникає необхідність розроблення екологічно безпечних технологій для знезараження та перероблення різних відходів. Виробництво біогазу може мати позитивний вплив на довкілля [285]:

1. Зменшення викидів парникових газів – біогаз в основному складається з метану та вуглекислого газу. Заміна викопного палива (нафта, вугілля тощо) біогазом зменшує викиди в атмосферу вуглекислого та інших парникових газів.

2. Застосування дигестату сприяє зменшенню хімічного навантаження на ґрунт у вигляді промислових добрив та сприяє підвищенню його родючості.

3. Процес анаеробного бродіння в біогазових установках є високотемпературним і потребує специфічних умов. Це сприяє знищенню насіння бур'янів та патогенних мікроорганізмів і зменшує ризик їх поширення.

З урахуванням сировинних ресурсів, виробництво біогазу є привабливою альтернативою. Зброджування органічних відходів у біогазових установках є одним з найпрогресивніших рішень для отримання енергії. З урахуванням від'ємного торгового балансу України та значним її потенціалом в аграрному секторі, необхідно зосередитися на цьому виробництві [25]. Це дало б змогу скоротити імпорт природного газу завдяки власним джерелам енергії.

Впровадження біогазових технологій сприятиме переходу на відновлювані джерела енергії. При цьому сировинна база досить різноманітна і ще значно не задіяна. Під час розкладання біомаси у природному середовищі проходить негативний вплив на довкілля. На відміну від вичерпних джерел

енергії, використання біовідходів сприятиме переходу до стійкішого енергетичного сектору [235]. Проте агровиробники, особливо на регіональному рівні, недостатньо обізнані щодо впливу на продуктивність сільськогосподарських культур, відновлення родючості ґрунтів, екологічної безпеки за використання дигестату.

Водночас, збільшення обсягів застосування синтетичних добривальних продуктів на певному етапі стає енергетично не вигідною та екологічно небезпечною. У країнах ЄС через загострення екологічних проблем планується поступово скорочувати обсяги застосування азотних і фосфорних добрив, що стало можливим завдяки досягненню високого рівня забезпеченості ґрунтів рухомими сполуками фосфору й калію. В Україні ще не досягнуто такого рівня застосування мінеральних добрив, як у європейських країнах, а внесення органічних добрив вже тривалий час знаходиться на досить низькому рівні. Основним видом у структурі їх застосування є гній ВРХ, потім пташиний послід. Проте в сучасному рослинництві можуть застосовуватися не лише традиційні види добрив. Особливе місце займають відходи тваринництва. Нині вони набули особливого значення у зв'язку зі створенням великих тваринницьких комплексів і птахоферм, де утворюється значна їх кількість. Відходи містять багато мобільних органічних сполук і мікроорганізмів, що створює низку проблем, у тому числі екологічних.

Склад органічних продуктів, отриманих на виході з біогазових установок, залежить від біохімічного складу вихідної та добавленої сировини, яка завантажувється в метантенк [153]. З 1 т вихідного продукту утворюється дигестату, кг: силосу кукурудзи – 780, курячого посліду – 890, жому – 910, гною ВРХ – 920, гноївки свиней – 990. На кожний мегават потужності біогазової установки за рік утворюється 40–50 тис. т такого дигестату [288]. При цьому оптимальне поєднання в дигестаті мікробіологічного та елементного складу дозволяє отримувати на його основі цінні біоорганічні добрива [154].

Україна має потужний сировинний потенціал для виробництва біогазу та дигестату. Тваринницькі комплекси і птахофабрики можна розглядати у першу чергу як виробників сировини, оскільки обсяги гною й посліду значно перевищують обсяги основної продукції, що є екологічною проблемою. Гній і послід спричиняють 7 % загального обсягу викидів закису азоту, який є одним із найнебезпечніших парникових газів [17, 99, 111]. Вони також містять патогени і бактерії, що стійкі до антибіотиків, і тому можуть стати причиною поширення хвороб. Надмірне використання антибіотиків на фермах призводить до виникнення та поширення стійких до них вірусів і бактерій. Через гній або послід вони потрапляють у довкілля та спричиняють захворювання тварин і людини [111]. Ці супутні продукти є також джерелом викидів у повітря аміаку, метану та інших газів. За зберігання в лагунах відкритого типу або внесенні на поля у великих дозах місцеве населення потерпає від неприємного специфічного запаху.

Анаеробне зброджування гною або посліду частково вирішує проблеми з відходами тваринництва – зменшує ризик забруднення ґрунтів і води, викиди в атмосферу. При ньому вони не зберігаються тривалий час у лагунах, що зменшує ризики, пов'язані з розгерметизацією, вимиванням, аварійними ситуаціями, а також зменшується ризик їх надлишкового внесення на поля.

Для інтенсифікації бродіння та більшого виділення метану в біогазову суспензію додають мікроелементи. Тому використання збагачених мікроелементами дигестатів у якості добрива є не дослідженим щодо тривалості застосування різних доз і періодичності внесення та впливу на агрофізичні та агрохімічні властивості ґрунту, формування врожаю та його якості. Використання дигестату може бути перспективним органічним добривом. На його основі можна виготовляти різні коктейлі завдяки додаванню необхідних сполук макро- та мікроелементів. Це дозволить їх застосовувати не лише на власних полях, але й продавати сусіднім агропідприємствам. При цьому нестабільність складу дигестату вимагає

сертифікації кожної партії. Ці питання потребують вирішення, що значно розширить відстані та обсяги його застосування [43].

У свиней коефіцієнт перетравлення корму набагато нижчий, ніж у жуйних тварин. Це обумовлено однокамерним шлунком і коротким кишечником. Тому вихід біогазу з гною свиней вищий завдяки багатому вмісту поживних речовин, які нерозкладені й невикористані організмом. Кури, як і всі птахи, мають короткий травний апарат, що неповно перетравлює корм. Послід настільки багатий сухою масою, що зазвичай його необхідно розбавляти водою, а високий вміст азоту може викликати проблеми з анаеробною ферментацією (інгібування процесу) [154]. Завдяки підвищеному вмісту органічних речовин і притаманній більшій здатності до біологічного розпаду порівняно з іншими відходами тваринництва, курячий послід є перспективним субстратом для виробництва біогазу [237]. Це дозволяє перетворювати послід зі шкідливого на прибутковий і корисний супутній продукт, що підвищує ефективність галузі.

Дигестат містить важливі для живлення рослин макро- та мікроелементи, амінокислоти [305], гумінові кислоти, гіберелін вітаміни, цукор, антибіотики, фізіологічно активні речовини тощо [425], що можуть ефективно сприяти підвищенню продуктивності рослин.

Добрива вироблені на основі біологічних відходів анаеробним зброджуванням, в першу чергу характеризуються вмістом амінокислот [234]. Це недооцінена додаткова перевага, оскільки амінокислоти, як готовий будівельний матеріал, сприяють росту рослин і формуванню врожаю. Вони полегшують функціонування метаболічної системи рослини, тому що їй більше не потрібно самостійно синтезувати певну кількість необхідних амінокислот. Це дозволяє рослині впродовж вегетації зосереджувати метаболізм, наприклад, на синтезі резервних сполук, що накопичуються в урожаї насіння або зерна, що збільшує врожайність і поліпшує його якість [383].



Окрім енергетичної, біоконверсія дозволяє вирішити й інші завдання. Зброджений гній порівняно зі звичайним підвищує врожайність сільськогосподарських культур на 10–20 %. Це пояснюється мінералізацією та зв'язуванням азоту під час анаеробної переробки і зменшенням його втрат майже на 30–40 % порівняно з традиційним способом зберігання гною. За анаеробної переробки у дигестаті збільшується частка амонійного азоту та рухомих сполук фосфору [106].

Супутні продукти біогазового виробництва на рідку і тверду фракції розділяють за допомогою віджимних сепараторів і центрофуг. За обеззаражування осадів центрофугуванням від 35 до 90 % сухої речовини виноситься з фугатом [158]. З метою підвищення агрохімічної ефективності азоту дигестату до нього можуть добавлятися інгібітори нітрифікації, що забезпечить збереження азоту добрив у ґрунті в амонійній формі впродовж 1,5–2 місяців.

З 1 т органічної сухої речовини можна одержати за його анаеробної переробки: гній дійних корів – 350 м<sup>3</sup> біогазу (250 кг умовного палива), гній ВРХ на відгодівлі – відповідно 450 і 321, гній свиней – 500 і 360, пташиний послід 660 м<sup>3</sup> біогазу (428 кг умовного палива) [158]. У Європейських країнах завдяки сприятливій законодавчій політиці на біогазових станціях переробляють силосну масу кукурудзи [243]. В Україні є значні сільськогосподарські ресурси, тому вона має значний потенціал для розвитку біогазового виробництва.

Основними перешкодами застосування дигестату у вигляді органічного добрива в Україні є: 1) нерегулярний контроль якості вхідної сировини і дигестату; крім того, зміна технологічних режимів упродовж року, формує його неконтрольований і непередбачуваний фізико-хімічний склад; 2) зазвичай дигестат більшості біогазових установок не можна вважати органічним добривом для органічного землеробства; 3) відсутній державний контроль за якістю дигестату та його застосуванням.

Ще не повністю вирішено питання утилізації побічних продуктів біогазового виробництва. Вони можуть піддаватися різним етапам перероблення й використовуватися як органічні добривальні продукти. У той же час дигестати можуть бути джерелом забруднення важкими металами. Тому класифікація супутніх продуктів біогазового виробництва є актуальною, а проблема агрохімічно обґрунтованого та екологічно безпечного їх застосування зумовлені значними обсягами накопичення на обмеженій території і раціональним застосуванням під сільськогосподарські культури.

Застосування органічних добрива потребує менше енергетичних ресурсів, ніж азоту мінеральних добрив для відновлення продуктивності ґрунту [397]. Дигестат містить більше поживних речовин, тому його реальний економічний потенціал вищий [364]. Він може бути ефективним способом зменшення втрат азоту порівняно з карбамідом за однакових доз внесення азоту [383]. Урожайність, отримана за внесення мінеральних і органічних добрив, не завжди може істотно відрізнятися [46, 365, 383]. Вважається, що позитивний ефект від азоту органічних добрив можна отримати лише після їх внесення впродовж кількох років.

Перед використанням дигестату важливо встановити його склад і врахувати наявність важких металів [318], які можуть негативно впливати на врожайність сільськогосподарських культур, якість продукції та екологічну безпеку. Тому за внесення дигестату важливо стежити за вмістом важких металів у ґрунті та регулювати їх надходження і вчасно реагувати на будь-які відхилення від прийнятих стандартів. Такий підхід допоможе забезпечити екологічну безпеку та зберегти якість ґрунту.

У ЄС, США, Канаді регламентують гранично допустимий вміст домішок в органічних і мінеральних добривах [349]. За рекомендаціями групи експертів ЄС, з компостом у ґрунт щорічно не повинно надходити більш як 25 кг/га важких металів, а саме: 10 – міді, 10 – хрому, 2,15 – свинцю, 2 – нікелю, 0,35 – миш'яку, 0,40 – ртуті й 0,10 – кадмію. В Україні такі регламенти відсутні.

Встановлено, наприклад, що у ґрунті, що зрошується стоками тваринницьких комплексів, зростає вміст деяких хімічних сполук. Так, їх внесення з розрахунку 600 кг/га азоту, вміст азоту нітратів підвищувався з 10 до 230 мг/кг ґрунту, амонійного азоту – з 7 до 55, рухомих фосфатів – з 160 до 200 і обмінного калію – з 350 до 370 мг/кг ґрунту [170].

Нормативи гранично допустимих концентрацій небезпечних речовин у ґрунтах затверджені постановою Кабміну України [141]. Зокрема, цим документом регламентується валовий вміст з урахуванням тла таких речовин удобрювальної дії: нітрати (за  $\text{NO}_3$ ) – 130,0 мг/кг; сульфати (за  $\text{SO}_4$ ) – 160,0; суперфосфат (за  $\text{P}_2\text{O}_5$ ) – 200,0; хлорид калію (за  $\text{K}_2\text{O}$ ) – 560,0 мг/кг. Також передбачено ГДК для рухомих форм мікроелементів з урахуванням їхнього кларку, з урахуванням фону: кобальту – 5, мангану – 140, міді – 3, молібдену – 10, нікелю – 4 і цинку – 23. Проте в Україні не передбачено порядок встановлення фонового валового вмісту вищевказаних хімічних елементів. Так, валовий вміст  $\text{P}_2\text{O}_5$  у ґрунтах може змінюватися в межах 100–1350 мг/кг [128],  $\text{K}_2\text{O}$  – 0,1–3–4 % [36, 168],  $\text{SO}_4$  – навіть перевищувати 1 % за масою [127].

Граничні нормативи внесення азотних добрив в Україні мають лише рекомендаційний характер з урахуванням ґрунтово-кліматичних умов [71].

Органічні добрива найбільш ефективні за дозованого їх внесення в ґрунт. Щорічна доза залежить від низки основних чинників: 1) природно-кліматичні умов регіону; 2) типу і стану ґрунту; 3) строків внесення; 4) рельєфу поля; 5) вирощуваної культури і запланованої урожайності; 6) якості добрива; 7) забезпеченості господарства органічними добривами; 8) технології внесення.

Питання з дозами внесення органічних добрив, порівняно з мінеральними, вирішено менш задовільно. У літературних джерелах зустрічаються досить суперечливі рекомендації – від 50 до 500 кг/га азоту гною тварин і посліду птахів під окремі культури за вмісту його в добриві 0,4 %. Весною і впродовж вегетації культур у поясі гігієнічної охорони водних

джерел рекомендується вносити гноївку разовою дозою не більш як 100 кг/га азоту. Доза гноївки з вмістом 0,25% азоту і 0,33 % калію за суцільного внесення залежно від потреби культури повинна бути у межах 20–60 т/га. В період вегетації у рядки не бажано її вносити більш як 20–30 т/га. При цьому доза внесення фосфору повинна бути 70–180 кг/га  $P_2O_5$  [188].

Дози і строки внесення органічних добрив необхідно встановлювати з урахуванням вмісту в них загального азоту залежно від ґрунтових умов, ротації культур у сівозміні, рівня застосування мінеральних добрив [124]. За іншими рекомендаціями органічні добрива зазвичай потрібно вносити великими дозами раз у 4–5 років, тобто одноразово 4–5-річну норму. Кращий результат дає внесення товстим шаром під оранку на 30–35 см за умови, що цей шар наступними обробітками не порушується. На ґрунтах з високою поглинальною здатністю їх можна вносити осінню під передпосівний обробіток ґрунту під озимі. Доза гною для підживлення не повинна перевищувати 20 т/га [105].

Дози внесення рідкої фракції безпідстилкового гною (з вмістом загального азоту 0,19 %) перед основним обробітком ґрунту під пшеницю озиму 63–74 м<sup>3</sup>/га, сорго – 21–32, соняшник – 16–26 м<sup>3</sup>/га. Під оранку дози внесення можуть бути збільшені у два рази. На одному полі гній необхідно вносити один раз у 2–3 роки. За щорічного внесення оптимальну дозу зменшують на 30 % [124]. Основою циклічності застосування органічних добрив є дотримання потреби орних земель в органічній речовині в межах 0–2,85 т/га залежно від гранулометричного складу ґрунту і структури сівозміни [188].

Кількість амонійного азоту у відношенні до загальної кількості азоту збільшується з 26–27 % у гноєві ВРХ та у пташиному посліді [158, 181] до 36–41 % у різних видах дигестату з курячого посліду (після ферментатора, сепаратора, доброжувача), тоді як у твердому дигестаті його міститься лише 20 %. Це, на нашу думку, потрібно врахувати під час розрахунку доз його внесення. Розрахунок доз внесення дигестату за вмістом у ньому загального

азоту може знижувати його ефективність у зв'язку з меншою доступністю азоту в рік його внесення.

Максимальна доза дигестату повинна обмежуватися граничною можливістю поглинання ґрунтом азоту і в поясі гігієнічної охорони водних джерел не повинна перевищувати 170 кг/га [124]. Її ( $D_{d(max)}$ ) можна визначити за формулою

$$D_{d(max)} = A_{max} : 10 C_{N-NH_4^+}, \text{ т/га,}$$

де  $A_{max}$  – максимальна допустима доза внесення азоту, кг/га;

$C_{N-NH_4^+}$  – масова частка азоту амонійних сполук у добриві, %.

Інтенсивність балансу азоту вважається задовільною за показника 100–110 % [30]. При цьому необхідно врахувати вміст у ґрунті рухомих сполук фосфору й калію, а також ймовірний їх баланс за вирощування певної культури. Якщо виявиться недоцільним внесення високих доз фосфору й калію, то удобрення дигестатом необхідно доповнити внесенням азоту мінеральних добрив. Так, як було показано проведеними дослідженнями, дигестат на основі курячого посліду містить на одиницю фосфору 1,04 одиниць загального та 0,37 одиниць азоту амонійних сполук, а наприклад, кукурудза в господарському їх винесенні має відношення  $P_2O_5 : N$  як 1 : 2,9.

Екологічно безпечна інтенсивність балансу фосфору й калію залежить від вмісту їх рухомих сполук у ґрунті і змінюється в широких межах – відповідно 80–280 % і 50–150 % [29]. При цьому необхідно врахувати нормативи гранично допустимих концентрацій їх у ґрунтах затверджені постановою Кабміну України від 15 грудня 2021 р. [141]. Зокрема, цим документом регламентується вміст: суперфосфат (за  $P_2O_5$ ) – 200,0 мг/кг і хлорид калію (за  $K_2O$ ) – 560,0 мг/кг. Розрахунок балансу елементів живлення на окремій земельній ділянці є зручним і важливим чинником планування господарської діяльності та прогнозування її наслідків [16]. Поряд з цим це не відображає реального стану ґрунтів, а лише оцінює їх найближчі ймовірні позитивні або негативні зміни.

Проведеними дослідженнями встановлено, що внесення дигестату напровесні забезпечує рослини пшениці озимої азотом за відновлення весняної вегетації і в кінці вегетації. Дигестат, як удобрювальний продукт, не поступаються сипучим мінеральним азотним добривам, підвищує врожайність та поліпшують якість зерна. Постійне використання цих добрив буде сприяти підвищенню родючості ґрунту та знижуватиме залежність від синтетичних добрив.

Отже, дигестат якісно й кількісно відрізняється від традиційних органічних і мінеральних удобрювальних продуктів: він близький або подібний природним сполукам; може цілеспрямовано вноситися в ґрунт для включення в біологічний цикл ґрунт–рослина–продукція; має високу біологічну активність; тривало та у великих кількостях може застосовується на одних і тих самих полях. Тому, підходи до оцінювання побічних ефектів його застосування повинні бути іншими, як і система заходів із запобігання негативних впливів [45]. Досліджень у цьому напрямку ще проведено недостатньо. Нині, за постійного розширення біогазових проєктів, річний вихід дигестату зростає, тому перспективи його застосування широкі, а потенціал розвитку великий.

На етапі прийняття управлінських рішень потрібно враховувати дані щодо виду, кількості та якості органічних добрив, технології зберігання та наявності достатньої площі сільськогосподарських угідь для внесення, ґрунтових умов (наявність схилів ділянок, ймовірність затоплення, гранулометричний склад ґрунту, вміст азоту мінеральних сполук у ґрунті), вмісту азоту в добриві та потребу культури в азоті, з урахуванням післядії попереднього внесення добрив [124].

Для запобігання непродуктивних втрат азоту необхідно уникати внесення рідких органічних добрив (РОД) у період з 15 листопада до 15 березня. При цьому ґрунтові води повинні залягати не вище на: піщаних ґрунтах 1,2–1,5 м; супіщаних – 1,5–2,5 і суглинистих – 2,5–3,0 м [16].

Прибережні захисні смуги є природоохоронною територією з обмеженим

режимом господарської діяльності [19]. Підвищений ризик забруднення вод продуктами ерозії ґрунту, що надходять з поверхневим водним стоком і внутрішньогосподарським латеральним стоком існує також на полях, що розташовані на схилах. Ефективність застосування органічних добрив повинна виключати забруднення поверхневих і підземних вод. Гнойові стоки і стічні води тваринницьких комплексів, а отже і дигестат, можна застосовувати лише за вмісту загального азоту до 120 мг/л у зоні Лісостепу і 100 мг/л – Степу. Доза азоту органічних добрив у поясі гігієнічної охорони водних джерел не повинна перевищувати 170 кг/га. Порушення співвідношення органічних добрив і площі для їх внесення, недосконалість систем зберігання й транспортування, недотримання доз і строків внесення несуть ризик забруднення довкілля біогенними елементами [124]. Екологічна безпека застосування дигестату повинно розглядатися насамперед на відповідність таким критеріям: 1) компенсація мінералізованої органічної речовини ґрунту та винесених з врожаєм елементів живлення; 2) вирішення проблем соціальної напруги навколо тваринницьких господарств; 3) відсутністю технологічних етапів, пов'язаних із використанням політантів і прекурсорів; 4) відсутністю проміжних побічних продуктів у процесі переробки; 5) запобіганню біологічного забруднення органічної речовини; 6) наданням продуктам переробки технологічних властивостей для тривалого зберігання і подальшого транспортування; 7) мінімізації емісії аміаку з добрива у процесі зберігання; 8) якісне механізоване внесення добрива у ґрунт [136].

За вирощування пшениці озимої дигестат можна вносити під обробіток ґрунту після збирання попередника та під передпосівну культивуацію, але його доза за ранніх строків сівби повинна бути мінімальною та враховувати запаси азоту мінеральних сполук в орному шарі ґрунту. Особливо ефективним буде внесення дефекації під час заробляння у ґрунт нетоварної частини урожаю попередника з високим відношенням вуглецю до азоту.

На вирівняних ділянках, краще всього дигестат вносити на трохи

підмерзлий ґрунт або за наявності снігового покриву завтовшки до 5 см. При цьому необхідно врахувати вміст азоту в дигестаті, особливо за внесення напровесні, коли велика його кількість може бути шкідлива для посівів. За результатами проведених досліджень на темно-сірому лісовому ґрунті легкосуглинкового гранулометричного складу оптимальна доза дигестату становить 10 м<sup>3</sup>/га. За потреби решту дози азоту необхідно внести у вигляді мінеральних добрив.

Кукурудза – одна з найбільш чутливих культур на поліпшення умов азотного живлення. При цьому, як відомо, значну частину азоту від господарського винесення врожаєм вона засвоює в кінці вегетації. Як уже зазначалось, у дигестаті 2/3 азоту містить у складі органічних сполук, які за сприятливих умов будуть мінералізуватися, що збільшуватиме доступність азоту. Дигестат під кукурудзу можна вносити з осені до весни. На ґрунтах важкого та середнього гранулометричного складу, особливо в регіонах недостатнього та нестійкого зволоження, найкращим періодом внесення є пізня осінь – кінець жовтня–початок зими (на вирівняних ділянках з частково замерзлим ґрунтом, або за незначного снігового покриву) без безпосереднього заробляння в ґрунт. Осіннє внесення дигестату буде особливо ефективним за умови заробляння в ґрунт післязбиральних решток попередника.

З дигестатом можна внести всю необхідну потребу кукурудзи в азоті, але кращі результати дає його поєднання з азотом синтетичних добрив у відношенні 1 : 1. При цьому доза азоту в перерахунку на мінеральний еквівалент становить 200 кг/га.

Оскільки в дигестаті лише 30–40 % азоту знаходиться у вигляді амонійних сполук, ефективним буде його внесення за зниження температури ґрунту нижче 10–5 °С, особливо з наступним проведенням пізньоосіннього безвідвального розпушування зябу без боронування.

Отже, дигестат біогазового виробництва може зайняти чільне місце в системах удобрення сільськогосподарських культур та сприяти відновленню й прогресуючому підвищенню родючості ґрунту в регіонах його виробництва.



## Висновки до розділу 6

1. Найменші витрати дигестату на формування 1 т зерна пшениці озимої (4,6 м<sup>3</sup>) забезпечує підживлення ним напровесні дозою 10 м<sup>3</sup>/га. При цьому 1 м<sup>3</sup> дигестату сприяє формуванню 216 кг зерна, тоді як за дози 30 м<sup>3</sup>/га – лише 20 кг.

2. Витрати азоту добрив на формування 1 т приросту врожаю зерна кукурудзи на 4 % менші порівняно з виробничим контролем (N<sub>ва200</sub>) за поєднання в системі її удобрення дигестату та аміаку водного у відношенні 1 : 1 за азотом. При цьому окупність азоту збільшується на 11 % порівняно з його внесенням у вигляді дигестату дозою 20 м<sup>3</sup>/га.

3. Окупність 1 грн витрат за різних систем удобрення пшениці озимої змінюється в межах 0,5–4,8 грн і є найвищою за підживлення її дигестатом дозою 10 м<sup>3</sup>/га, навіть за перевезення від заводу до поля на відстань до 56 км.

4. За внесення під кукурудзу 200 кг/га азоту вартість приросту врожаю зерна змінюється від 20,1 тис. до 22,5 тис. грн/га залежно від варіанту досліду і є найвищою за внесення 10 м<sup>3</sup>/га дигестату та додаткового внесення аміаку водного у відношенні за азотом як 1 : 1.

5. Застосування дигестату в системі удобрення пшениці озимої і кукурудзи є економічно виправданим і може замінити дороговартісні синтетичні азотні добрива. При цьому необхідно врахувати перш за все витрати на транспортування дигестату від заводу до поля.

6. За ранньовесняного підживлення пшениці озимої дигестатом дозою 10 м<sup>3</sup>/га чистий енергетичний прибуток становить 30,35 ГДж/га, або 99 % від традиційного підживлення синтетичними азотними добривами (N<sub>109</sub>). З підвищенням його дози до 30 м<sup>3</sup>/га він становить лише 5 % від виробничого контролю, а коефіцієнт енергетичної ефективності знижується при цьому з 5,9 до 0,2.

7. Внесення дигестату під кукурудзу у різних поєднаннях з аміаком водним

із загальною дозою азоту 200 кг/га забезпечує енергетичну ємність приросту врожаю зерна 93–104 % від виробничого контролю ( $N_{ва200}$ ) і найвищою є за внесення 10 м<sup>3</sup>/га дигестату та аміаку водного у відношенні доз їх азоту 1 : 1.

8. Найнижчі енергетичні витрати (28 % від варіанту  $N_{ва200}$ ) забезпечує внесення під кукурудзу 75 % азоту у вигляді 15 м<sup>3</sup>/га дигестату та 25 % – аміаку водного. При цьому енергетична собівартість 1 т зерна знижується з 6,39 до 1,88 ГДж.

9. Заміна в системі удобрення кукурудзи аміаку водного дигестатом дозою 10–20 м<sup>3</sup>/га підвищує чистий енергетичний прибуток на 37–46 %, а коефіцієнт енергетичної ефективності – з 1,4 до 3,2–3,7.

Основні положення цього розділу викладені в таких наукових працях автора зі списку використаних джерел [47, 186, 187].

## ВИСНОВКИ

У дисертації викладено теоретичне узагальнення та нове вирішення наукового питання – підвищення врожайності та якості зерна пшениці озимої і кукурудзи, яке полягає в удосконаленні системи їх удобрення завдяки використанню дигестату на основі курячого посліду, що дозволило сформулювати такі висновки.

1. Розвиток біогазового виробництва зростає, що збільшує виробництво дигестату, який можна використати як органічний удобрювальний продукт. Проте умови його застосування та ефективність нині вивчені недостатньо.

2. Рідкий дигестат має високий вміст макро- та мікроелементів і може бути цінним удобрювальним продуктом, з урахуванням того, що його потрібно утилізували на незначній відстані від біогазової установки. Нині немає обмежень щодо реалізації дигестату як удобрювального продукту органічного походження.

3. Агрохімічний склад і характеристики дигестату залежать від виду та походження вихідної сировини, яка завантажується в метантенк, що потребує дослідження кожної його партії. З дигестатом нині проводять багато досліджень у рослинництві, особливо із зерновими культурами, але їх результати потребують уточнення в конкретних ґрунтово-кліматичних умовах. Перш за все необхідно уточнити максимальні дози його внесення, ефективність під різні сільськогосподарські культури.

4. Дози внесення азоту з різними удобрювальними продуктами у підживлення та стадії розвитку рослин пшениці озимої істотно впливають на вміст азоту мінеральних сполук у в шарі ґрунту 0–40 см. Підживлення дигестатом, порівняно з азотними добривами, поліпшує азотний режим ґрунту в кінці вегетації пшениці озимої.

5. Ранньовесняне підживлення пшениці озимої дигестатом у дозі 10–30 м<sup>3</sup>/га за впливом на показники якості зерна не поступається традиційній системі її удобрення синтетичними азотними добривами. Зі збільшенням дози

дигестату до 20 і 30 м<sup>3</sup>/га збір білка з одиниці площі посіву знижується відповідно на 16 і 42 %, що пояснюється зменшенням урожайності зерна.

6. Підживлення пшениці озимої дигестатом у дозі 10 м<sup>3</sup>/га забезпечує інтенсивність балансу азоту 61,0 %, фосфору – 168,4 і калію 200,5 %, що свідчить про необхідність додаткового внесення азоту. При цьому коефіцієнт використання з дигестату азоту становить 82,6 %, фосфору – 32,6 й калію 77,4 % і знижується за дози його внесення 30 м<sup>3</sup>/га відповідно до 13,9 %, 4,8 і 22,0 %.

7. За різних систем удобрення врожайність кукурудзи збільшується на 2,65–2,96 т/га або на 46–51 % за врожайності на контролі без добрив 5,80 т/га. За внесення 10 м<sup>3</sup>/га дигестату в поєднанні з аміаком водним спостерігається тенденція збільшення врожайності на 0,31 т/га або на 12 % порівняно з внесенням лише дигестату в дозі 20 м<sup>3</sup>/га.

8. Внесення під кукурудзу дигестату в дозі 20 м<sup>3</sup>/га порівняно з виробничим контролем (Nва<sub>200</sub>) істотно не змінює показників якості зерна. При цьому спостерігається тенденція поліпшення натури зерна та вмісту в ньому протеїну.

9. Найбільш сприятливо баланс азоту, фосфору та калію в ґрунті за умови видалення з поля лише зерна кукурудзи – відповідно 68,0 кг/га, 54,1 і 44,2 кг/га складається за системи удобрення Дигестат 10 м<sup>3</sup>/га + Nва і загальної дози азоту 200 кг/га.

10. Найменші витрати дигестату на формування 1 т зерна пшениці озимої (4,6 м<sup>3</sup>) забезпечує підживлення ним напровесні дозою 10 м<sup>3</sup>/га. При цьому 1 м<sup>3</sup> дигестату сприяє формуванню 216 кг зерна. Витрати азоту добрив на формування 1 т приросту врожаю зерна кукурудзи на 4 % менші порівняно з виробничим контролем (Nва<sub>200</sub>) за поєднання в системі її удобрення дигестату та аміаку водного у відношенні 1 : 1 за азотом. При цьому окупність азоту збільшується на 11 % порівняно з його внесенням у вигляді дигестату дозою 20 м<sup>3</sup>/га.

11. Застосування дигестату в системі удобрення пшениці озимої і кукурудзи є економічно виправданим і може замінити дороговартісні синтетичні азотні добрива. При цьому необхідно врахувати перш за все витрати на транспортування дигестату від біогазової установки до поля. Окупність 1 грн витрат за різних систем удобрення пшениці озимої змінюється в межах 0,5–4,8 грн і є найвищою за підживлення її дигестатом дозою 10 м<sup>3</sup>/га, навіть за його перевезення на відстань до 56 км.

12. За внесення під кукурудзу 200 кг/га азоту вартість приросту врожаю зерна змінюється від 20,1 тис. до 22,5 тис. грн/га залежно від варіанту дослідження і є найвищою за внесення 10 м<sup>3</sup>/га дигестату в поєднанні з аміаком водним у відношенні за азотом як 1 : 1.

13. За ранньовесняного підживлення пшениці озимої дигестатом дозою 10 м<sup>3</sup>/га чистий енергетичний прибуток становить 30,35 ГДж/га, або 99 % від традиційного підживлення синтетичними азотними добривами (N<sub>109</sub>).

14. Заміна в системі удобрення кукурудзи аміаку водного дигестатом дозою 10–20 м<sup>3</sup>/га підвищує чистий енергетичний прибуток на 37–46 %, а коефіцієнт енергетичної ефективності – з 1,4 до 3,2–3,7. Найнижчі енергетичні витрати (28 % від варіанту дослідження N<sub>ва200</sub>) забезпечує внесення під кукурудзу 75 % азоту у вигляді 15 м<sup>3</sup>/га дигестату та 25 % – аміаку водного. При цьому енергетична собівартість 1 т зерна знижується з 6,39 до 1,88 ГДж.

## РЕКОМЕНДАЦІЇ ВИРОБНИЦТВУ

Господарствам різних форм власності Правобережного Лісостепу України для забезпечення сталого відновлення та поліпшення агрохімічних властивостей темно-сірого лісового ґрунту середньо суглинкового гранулометричного складу з низьким вмістом азоту легкогідролізованих сполук (за методом Корнфілда) та дуже високим – рухомими сполуками фосфору і калію (за методом Чирикова), забезпечення високої продуктивності сільськогосподарських культур рекомендується застосовувати рідкий дигестат на основі курячого посліду з вмістом 1,1 % азоту, 0,97 –  $P_2O_5$  і 0,81 %  $K_2O$ :

1. Для ранньовесняного підживлення пшениці озимої дозою 10 м<sup>3</sup>/га, що замінить внесення синтетичних азотних добрив напровесні та на стадії ВВСН 28–29 загальною дозою азоту 109 кг/га.
2. Для осіннього внесення під кукурудзу в дозі 20 м<sup>3</sup>/га або в поєднанні з аміаком водним у відношенні за азотом 1 : 1 за дози N<sub>200</sub>.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Адаменко Т. Зміна клімату та сільське господарство в Україні: що варто знати фермерам? Київ : Німецько Український агрополітичний діалог, 2019. 36 с.
2. Адаменко Т. І., Кульбіда М. І., Прокопенко А. Л. Агрокліматичний довідник по території України. Кам'янець-Подільський, 2011. 107 с.
3. Адаптація агротехнологій до зміни клімату: ґрунтово-агрохімічні аспекти. За ред. С. А. Балюка, В. В. Медведєва, Б. С. Носка. Харків : Стильна типографія, 2018. 364 с.
4. Бабіченко В. М., Ніколаєва Н. В., Тушина Л. М. Зміни температури повітря на території України наприкінці ХХ та на початку ХХІ століть. *Український географічний журнал*. 2007. № 4. С. 3–12.
5. Барило А. А., Бенменні М., Будько М. О. та ін. Відновлювані джерела енергії: монографія; за заг. ред. С. О. Кудрі. Київ : Інститут відновлюваної енергетики НАНУ, 2020. 392 с.
6. Бацула А. А., Абрамов С. П., Скрыльник Е. В. и др. Влияние стоков животноводческих комплексов промышленного типа на содержание нитратов в почве, грунтовых водах и сельскохозяйственной продукции. Экологические последствия применения агрохимикатов (удобрений). Пушкино, Научный центр биологических исследований, 1982. С. 72–74.
7. Бацула О. О., Лісовий М. В. Оновлені підходи до управління родючістю ґрунтів у сучасних умовах. *Технологія відтворення родючості ґрунтів у сучасних умовах*. Київ-Харків, 2003. С. 10–19.
8. Біоенергетична оцінка сільськогосподарського виробництва (науково-методичне забезпечення); Ю. О. Тараріко, О. Ю. Несмашна, О. М. Бердніков та ін. Київ : Аграрна наука, 2005. 200 с.
9. Блюм Я. Б., Григорюк І. П., Дмитрук К. В. Система використання біоресурсів у новітніх біотехнологіях отримання альтернативних палив. Київ : Аграр Медіа Груп, 2014. 360 с.

10. Богатир Т. К. Агрокліматичний довідник агронома. Київ : Урожай, 1964. 159 с.
11. Богданович Р. П., Кудлай М. О. Вплив різних норм і видів органічних добрив на показники гумусного стану чорнозему типового. *Вісник аграрної науки*. 2007. № 9. С. 12–15.
12. Болтянська Н. І, Болтянський О. В. Формування моделі механізму застосування технологій ресурсозбереження на молочнотоварних фермах. *Сучасні проблеми та технології аграрного сектору України: зб. наук. пр.* Ніжин, 2019. Вип. 12. С. 26–32.
13. Болтянський Б. В. Обґрунтування конструктивно-функціональної схеми біореактора – установки для переробки органічних відходів (гною). *Праці Таврійського ДАУ*. Мелітополь, 2015. Вип. 15. Т. 3. с. 182–188.
14. Виробництво та використання органічних добрив : монографія; за заг. ред. І. А. Шувара. Івано-Франківськ : Симфонія форте, 2015. 596 с.
15. Власюк П. А., Шкварук Н. М., Сапатый С. Е., Шамотиенко Г. Д. Химические элементы и аминокислоты в жизни растений, животных и человека. Киев : Наукова думка, 1974. 220 с.
16. Внутрігосподарський контроль стану ґрунтів (наукові рекомендації); за ред. М. Мірошніченка. Харків, 2023. 121 с.
17. Вовк В. Ю. Економічна ефективність використання безвідходних технологій в АПК. *Економіка, фінанси, менеджмент: актуальні питання науки і практики*. 2020. № 4 (54). С. 186–206. DOI: <https://doi.org/10.37128/2411-4413-2020-4-13>.
18. Вовк В., Красносельська А. Еколого-економічні аспекти трансформації енергетичного забезпечення України в умовах війни та повоєнного відновлення. *Економіка та суспільство*. 2023. DOI: 10.32782/2524-0072/2023-56-82.
19. Водний кодекс України. Розділ IV. Охорона вод. Ст. 88, 89. <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/213/95-%D0%B2%D1%80#Text>.



20. Волкогон В. В., Бердніков О. М., Лопушняк В. І. Екологічні аспекти системи удобрення сільськогосподарських культур; за ред. В. В. Волкогона. Київ : Аграрна наука, 2019. 264 с.
21. Волкогон В. В., Надкернична О. В., Токмакова Л. М. та ін. Експериментальна ґрунтова мікробіологія; за ред. В. В. Волкогона. Київ : Аграрна наука, 2010. 464 с.
22. Врублевська О. О., Катеруша Г. П. Клімат України та прикладні аспекти його використання. Одеса : ОДЕКУ, 2012. 180 с.
23. Галушкіна Т. П. Зелений порядок денний для України в просторовому вимірі: сценарії та інструменти: монографія. Львів : ННВК «АТБ», 2023. 290 с.
24. Голуб Г. А., Марус О. А. Розробка біогазового реактора обертового типу для твердофазної ферментації. *Матер. IV міжнар. наук.-пр. конф. «Біоенергетичні системи»* (29 травня 2020 р., Житомир). Житомир, 2020. С. 46–47.
25. Гонтарук Я. В. Перспективи виробництва біогазу на цукрових заводах України. *Східна Європа: економіка, бізнес та управління*. 2022. № 1(34). С. 69–75. DOI: <https://doi.org/10.32782/easterneurope.34-12>.
26. Гончарук І. В., Вовк В. Ю. Виробництво біометану з агробіомаси в Україні: проблеми та перспективи. *Подільський вісник: сільське господарство, техніка, економіка*. 2022. Вип. 2 (37). Сільськогосподарські науки. С. 65–72. DOI: <https://doi.org/10.37406/2706-9052-2022-2-10>
27. Гончарук І. В., Панцирева Г. В., Вовк В. Ю., Верховлюк 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>
28. Господаренко Г. М. Агрохімія мікроелементів. Київ : ТОВ «ТРОПЕА», 2023. 416 с.
29. Господаренко Г. М. Агрохімія. Київ : ТОВ «ТРОПЕА», 2024. 572 с.
30. Господаренко Г. М. Система застосування добрив. Київ : ТОВ «ТРОПЕА», 2022. 376 с.

31. Господаренко Г. М. Удобрення сільськогосподарських культур. Київ : «СІК ГРУП Україна», 2016. 276 с.
32. Господаренко Г. М., Мартинюк А. Т., Невлад В. І. Обґрунтування межі доцільності застосування фосфорних добрив. *Вісник Уманського НУС*. 2021. №2. С. 13–19. DOI 10.31395/2310-0478-2021-2-13-19.
33. Господаренко Г. М., Черно О. Д., Чередник А. Ю. Формування родючості ґрунту за різних систем удобрення в польовій сівоzmіні. *Агрологія*. 2019. Т. 2. №1. С. 3–9.
34. Господаренко Г. М., Черно О. Д., Кравець І. С. Азотний статус ґрунту за тривалого застосування добрив у польовій сівоzmіні. *Зб. наук. пр. Уманського НУС*. 2024. Вип. 104. Ч. 1. С. 149–160. DOI: 10.32782/2415-8240-2024-104-1-149-160.
35. Господаренко Г. М., Черно О. Д., Мартинюк А. Т. Агроекономічні перспективи застосування азотних добрив під польові культури. *Зб. наук. пр. Уманського НУС*. 2021. Вип. 99. Ч. 1. С. 6–16. DOI 10.31395/2415-8240-2021-99-1-6-16.
36. Господаренко Г. М., Черно О. Д., Нікітіна О. В. Агрохімія калію / за заг ред. Г. М. Господаренка. Київ : ТОВ «ТРОПЕА», 2021. 264 с.
37. Господаренко Г. М., Черно О. Д., Новак А. В. Вплив метеорологічних умов та удобрення на врожайність кукурудзи у Правобережному Лісостепу. *Зб. наук. пр. Уманського НУС*. 2023. Вип. 102. Ч. 1. С. 26–34. DOI: 10.32782/2415-8240-2023-102-1-26-34.
38. Господаренко Г. М., Черно О. Д., Чередник А. Ю. Значення органічних добрив у системі удобрення культур польової сівоzmіні. *Вісник Львівського національного аграрного університету*. Серія Агрономія. 2019. №22 (2). С. 184–190.
39. Господаренко Г. М. Практикум з агрохімії. Київ : ТОВ «СІК ГРУП УКРАЇНА», 2020. 148 с.

40. Господаренко Г. М., Прокопчук І. В., Бойко В. П. Засвоєння основних елементів живлення з ґрунту й мінеральних добрив кукурудзою. *Зб. наук. пр. Уманського НУС*. 2019. Вип. 95. Ч. 1. С. 76–89.

41. Господаренко Г. М., Шевчук О. В. Вплив дигестату на формування продуктивності кукурудзи. *Зб. пр. учасників Міжнар. наук.-практ. конф. «Інноваційні технології в рослинництві та землеробстві»*. (Житомир, 3–4 квітні 2025 р.). Житомир, 2025. С. 297–305.

42. Господаренко Г. М., Шевчук О. В. Ефективність підживлення пшениці озимої рідким дигестатом. *Матер. Міжнар. наук.-практ. конф. «Інновації у сучасному агропромисловому виробництві»* (Одеса, 21–22 вересня 2023 р.). Одеса, 2023. С. 251–255.

43. Господаренко Г. М., Шевчук О. В. Перспективи використання на удобрення біогазової суспензії. *Матеріали Всеукраїнської науково-практичної конференції «Актуальні питання агротехнологій»* (м. Умань, 27 жовтня 2022 р.). Умань : УНУС, 2022. С. 15–18.

44. Господаренко Г., Стоцький В., Кулеша А. Урожайність кукурудзи залежно від видів мінеральних добрив і їх поєднань у польовій сівоzmіні. *Матер. Всеукр. наук.-практ. конф. «Рубіновські читання»* приуроченої до 180-річчя від дня заснування Уманського національного університету садівництва (16 травня, м. Умань). Умань : УНУС, 2024. С. 7–8.

45. Господаренко Г. М. Обґрунтування дози внесення рідких органічних добрив. *Наукове обґрунтування фітосанітарної безпеки України: теорія і практика: матеріали Всеукр. наук.-практ. Інтернет-конф.* (10 грудня 2021 року, м. Херсон). Херсон: ІЗЗ НААН, 2021. С. 85–86.

46. Господаренко Г. М. Основи інтегрованого застосування добрив у польовій сівоzmіні. Київ : ЗАТ «Нічлава», 2002. 342 с.

47. Господаренко Г., Шевчук О. Енергетична ефективність застосування дигестату під пшеницю озиму та кукурудзу. *Збірник тез міжнародної інтернет-конференції «Наукове забезпечення виробництва*

конкурентоспроможної с.-г. продукції в умовах формування екологічностійких агроландшафтів». (Умань, 17 червня 2025 р.). Умань, 2025. С. 52–54.

48. Грабовський М. Б. Потенціал виробництва біогазу з силосної маси сорго цукрового та кукурудзи. *Таврійський наук. вісник*. 2019. Вип. 106. С. 26–32.

49. Грабовський О. В., Рошко В. Г., Ніколайчук О. І. Акумуляція важких металів ґрунтом та рослинними об'єктами в умовах антропогенного навантаження. *Наук. вісник УжДУ. Серія Біологія*. 2000. № 8. С. 158–160.

50. Грицуляк Г. М. Еколого-агрохімічна оцінка застосування осаду стічних вод як добрива за вирощування фітоенергетичних культур: автореф. дис. ... д. с.-г. н.: 03.00.16. Дніпро, 2024. 42 с.

51. Демиденко О. В. Трансформація органічного вуглецю в агроценозах Лісостепу. Чорнобай : Чорнобаївське КПП, 2022. 388 с.

52. Дешко В. І., Братішко В. В., Мінералов О. І., Романенко Т. Б. Подрібнювач. Патент України на корисну модель 127136. МПК В02С 18/06. Опубл. 25.04.2017. Бюл. № 8.

53. Дешко В. І., Мінералов О. І., Дребот О. І. та ін. В. Спосіб приготування органічного добрива з курячого посліду та об'ємистих рослинних подрібнених добавок. Заявка на пат. № а202303060 від 23.06.2023 Р. МПК АG1L 11/00, АG1L 2/16, F26В 1/02, В01F 7/08.

54. Директива Ради ЄС [1/676/ЄС від 21 грудня 1991 р.

55. Діагностика збалансованості мінерального живлення польових культур: наук.-метод. рекомендації: за наук. ред. М. М. Мірошніченка, Є.Ю. Гладкіх. Харків, 2022. 47 с.

56. Доброжан Ю. В. Санітарно-гігієнічна оцінка посліду курей за вмістом антибіотиків : автореф. дис. ... канд. вет. наук : 16.00.06. Київ, 2020. 22 с.

57. ДСТУ 4115-2002. Ґрунти. Визначання рухомих сполук фосфору і калію за модифікованим методом Чирикова. [Чинний від 2003-01-01]. Вид. офіц. Київ, 2002. 10 с.

58. ДСТУ 4117:2007. Зерно та продукти його переробки. Визначення показників якості методом інфрачервоної спектроскопії. Київ, 2007. 7 с.

59. ДСТУ 4287: 2004. Якість ґрунту. Відбирання проб. Чинний від 2005-07-01. Київ : Держспоживстандарт України, 2005. 10 с.
60. ДСТУ 4289:2004. Якість ґрунту. Методи визначання органічної речовини. [Чинний від 2005-07-01]. Вид. офіц. Київ : «Держспоживстандарт», 2005. 14 с.
61. ДСТУ 4362:2004. Якість ґрунту. Показники родючості ґрунтів. [Чинний від 2006-01-01]. Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2005. 23 с.
62. ДСТУ 4729:2007. Якість ґрунту. Визначання нітратного і амонійного азоту в модифікації ННЦ ІГА ім. О. Н. Соколовського. [Чинний від 2008-01-01]. Київ : Держспоживстандарт України, 2008. 14 с.
63. ДСТУ 4944:2008 *Агрохімікати. Встановлення допустимих концентрацій шкідливих речовин.* [Чинний від 2009-01-01]. Київ : Держспоживстандарт України, 2009. 8 с.
64. ДСТУ 7537:2014. Якість ґрунту. Визначення гідролітичної кислотності: [Чинний від 2014-11-21]. Київ : Держспоживстандарт України. 2014. 9 с.
65. ДСТУ 7670:2014. Сировина і продукти харчові. Готування проб. Мінералізація для визначання вмісту токсичних елементів. Київ : УкрНДНЦ, 2015. 11 с.
66. ДСТУ 7846:2015 Якість ґрунту. Оцінювання зміни родючості ґрунтів. Порядок проведення робіт. Київ : УкрНДНЦ, 2016. 9 с.
67. ДСТУ 7863 : 2015. Якість ґрунту. Визначення легкогідролізованого азоту методом Корнфілда. Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2016. 5 с.
68. ДСТУ 7872:2015. Охорона ґрунтів. Деградація ґрунтів. Оцінювання хімічної та фізичної деградації ґрунтів. Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2016. 11 с.
69. ДСТУ 7881:2015. Добрива органічні та органо-мінеральні. Нуменклатура показників якості. Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2016. III. 9 с.
70. ДСТУ 7911:2015. Добрива органічні та органо-мінеральні. Методи визначення сумарної масової частки азоту та масової частки амонійного азоту. Київ : УкрНДНЦ, 2016. 15 с.

71. ДСТУ 7925:2015. Якість ґрунту. Максимально допустимі норми внесення азотних добрив під сільськогосподарські культури залежно від ґрунтів та природних зон. Чинний від 2016-09-01. Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2016. 8 с.
72. ДСТУ 7938 : 2015. Добрива органічні. Агрономічні вимоги щодо якості використання добрив в органічному виробництві. Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2016. III. 5 с.
73. ДСТУ 7949:2015. Добрива органічні. Метод визначення масової частки загального калію. Київ : УкрНДНЦ, 2016. 18 с.
74. ДСТУ 8727:2017. Осад стічних вод. Підготування орґано-мінеральної суміші з осаду стічних вод [Текст]. Чинний від 2018-04-01. Київ : УкрНДНЦ, 2018. IV. 9 с.
75. ДСТУ EN ISO 10304-1:2022 (EN ISO 10304-1:2009, IDT; ISO 10304-1:2007, IDT) / Поправка № 1:2022 (EN ISO 10304-1:2009/AC:2012, IDT; ISO 10304-1:2007 / Cor 1:2010, IDT). Якість води. Визначення розчинених аніонів методом рідинної іонної хроматографії. Ч. 1: Визначення броміду, хлориду, фтору, нітрату, нітриту, фосфату та сульфату. [Чинний від 2022-12-28]. № 285; [Чинний від 2023-04-13]. № 64. 23 с. URL: <http://katalog.uas.org.ua/>.
76. ДСТУ EN ISO 14911:2022 (EN ISO 14911:1999, IDT; ISO 14911:1998, IDT). Якість води. Визначення розчиненого  $\text{Li}^+$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{NH}_4^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Mn}_2^+$ ,  $\text{Ca}_2^+$ ,  $\text{Mg}_2^+$ ,  $\text{Sr}_2^+$  і  $\text{Ba}_2^+$  за допомогою іонної хроматографії. Метод для води та стічних вод. [Чинний від 2022-12- 28]. № 285; [Чинний від 2023-04-13]. № 64. 21 с. URL: <http://katalog.uas.org.ua/>.
77. ДСТУ ISO 10390:2022. Якість ґрунту. Визначення рН (ISO 10390:2005, IDT). [Чинний від 2022-09-05]. Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2022. 16 с.
78. ДСТУ ISO 11260:2001. Якість ґрунту. Визначення ємності катіонного обміну та насиченості основами з використанням хлориду барію. (ISO 11260:1994, IDT). Київ : Держстандарт України, 2002. 16 с.
79. ДСТУ ISO 11464:2007. Якість ґрунту. Попереднє оброблення зразків для фізико-хімічного аналізу. Київ : Держспоживстандарт України, 2012. 12 с.

80. ДСТУ ISO 11465:2007. Якість ґрунту. Визначення сухої речовини та вологості за масою. Гравіметричний метод (ISO 11465:1993, IDT). Київ : Держстандарт України, 2012. 9 с.
81. ДСТУ ISO 21415–1:2009. Пшениця і пшеничне борошно. Вміст клейковини. Ч. 1. Визначення сирої клейковини ручним способом. Київ, 2011. 12 с.
82. ДСТУ ISO 3093:2019. Пшениця, жито та борошно з них, пшениця тверда й манні крупи з твердої пшениці. Визначення числа падіння методом Хагберга-Пертена (Hagberg-Perten) (ISO 3093:2004, IDT). Київ. 13 с.
83. ДСТУ ISO 520:2015. Зернові і бобові. Визначення маси 1000 зерен. Київ, 2015. 10 с.
84. ДСТУ ГОСТ 10840:2019. Зерно. Метод визначення натури. Київ, 2019. 10 с.
85. ДСТУ ГОСТ 29144:2009. Зерно і зернопродукти. Визначення вологості (базовий контрольний метод). Київ, 2009. 11 с.
86. Дудка І. О., Мережко Т. О., Гайова В. П. Мікологічний моніторинг як засіб оцінки і прогнозування фітосанітарного стану лісових екосистем. *Український ботанічний журнал*. 1994. Т. 51. № 6. С. 53–59.
87. Екологічна біотехнологія переробки синьо-зелених водоростей : монографія. М. В. Загірняк та ін. Кременчук : ПП Щербатих О. В., 2017. 104 с.
88. Єрмакова Л. М., Крестьянінов Є. В. Урожайність кукурудзи залежно від удобрення та гібриду на темно-сірих опідзолених ґрунтах. *Вісник Полтав. держ. аграрної акад.* 2016. № 4. С. 63–65.
89. Єщенко В. О., Копитко П. Г., Костогриз П. В., Опришко В. П. Основи наукових досліджень; за ред. В. О. Єщенка. Вінниця : ПП «ТД «Едельвейс і К», 2014. 332 с.
90. Закон України «Про альтернативні види палива» від 14 січня 2000 р. Відомості Верховної Ради України (ВВР), 2000. № 1391-XIV (ст. 1).
91. Закон України «Про внесення змін до Закону України «Про альтернативні види палива» щодо розвитку виробництва біометану» № 5464

від 05.05.2021 Р. URL: [http://w1.c1.rada.gov.ua/pls/zweb2/webproc4\\_1?pf3511=71839](http://w1.c1.rada.gov.ua/pls/zweb2/webproc4_1?pf3511=71839).

92. Іваніна Р. В. Винос та баланс елементів живлення в зернових ланках сівозміни за різних систем удобрення. *Наукові доповіді НУБіП України*. 2019; 6(82). <http://doi.org/10.31548/dopovidi2019.06.011>

93. Каленська С. М., Таран В. Г., Данилів П. О. Особливості формування урожайності гібридів кукурудзи залежно від удобрення, густоти стояння рослин та погодних умов. *Таврійський науковий вісник*. 2018. № 101. С. 42–49.

94. Калінчик М. В., Ільчук М. М., Калінчик М. Б. Економічне обґрунтування норм внесення мінеральних добрив залежно від ціни на ресурси та продукцію. Київ : Нічлава, 2006. 43 с.

95. Кернасюк Ю. В. Методологічні підходи до визначення собівартості виробництва та економічної ефективності продукції біоенергетичної утилізації гною (метод. рекомендації). Кіровоград: Кіровоградський ін-т АПВ, 2010. 24 с.

96. Клімат України. Київ : Укр. наук.-досл. гідрометеорологічний інститут, 2003. 564 с.

97. Коваленко В. П., Халак В. І., Нежлукченко Т. І., Папакіна Н. С. Біометричний аналіз мінливості ознак сільськогосподарських тварин і птиці. Херсон : Олді-плюс, 2010. 240 с.

98. Козир В. С., Сокрут О. В., Чернявський С. Є., Тимченко Л. О. Особливості використання різної сировини при виробництві біогазу. *Бюлетень Інституту сільського господарства степової зони НААН України*. 2013. № 4. С. 143–146.

99. Курбатова Т. О., Гирченко Є. В. Економічні перспективи розвитку сектору біогазу на основі використання органічних відходів сільського господарства. *Modern economics*. 2019. № 14. С. 121–129.

100. Куріс Ю. В. Біоенергетичні установки. Обладнання та технології переробки органовмісних ресурсів: монографія. Запоріжжя : ЗДІА, 2012. 275 с.

101. Кучерук П. П. Биогазовые установки в сельском хозяйстве и на станциях очистки сточных вод. Киев : ИТТФ НАНУ, 2009. 25 с.



102. Лазурський О. В. Гній і мінеральні добрива у польовій сівозміні. Київ : Урожай, 1972. 218 с.
103. Лихочвор В. В. Мінеральні добрива та їх застосування. Львів : НВФ Укр. технології, 2008. 312 с.
104. Логуш І. В., Чвартацький І. І., Фльонц І. В. Обґрунтування технологічної схеми біогазової установки інтенсивної ферментації біомаси. *Матер. Міжнар. наук.-практ. конф. «Наука і освіта в інтелектуально-інноваційному розвитку суспільства»*. (16–17 травня 2019 р., Бережани). Бережани. 2019. С. 286–287.
105. Лукьяненко И. И. Приготовление и использования органических удобрений. Москва : Россельхозиздат, 1982. 207 с.
106. Лутковська С. М., Зеленчук Н. В. Оцінка потенціалу виробництва біогазу особистими селянськими господарствами. *Економічний вісник НТУ України «Київський політехнічний інститут»*. 2023. С. 15–20.
107. Мазур В. А., Паламарчук В. Д., Поліщук І. С., Паламарчук О. Д. Новітні агротехнології у рослинництві. Вінниця, 2017. 588 с.
108. Мазур К., Гонтарук Я. Перспективи розвитку виробництва біопалива в особистих селянських господарствах. *Підприємництво та інновації*. 2022. С. 32–36.
109. Максінко Л. М. Вплив біодобрива на родючість ґрунту і отримання екологічно безпечної продукції. Scientific achievements of modern society. Abstracts of VIII International Scientific and Practical Conference Liverpool, United Kingdom 1–3 April 2020. Liverpool, United Kingdom. 2020. С. 551–557.
110. Малиновська І. М., Карпенко В. П., Леонтюк І. Б. Динаміка мінералізаційних процесів у кореневій зоні кукурудзи на зерно за використання різних систем удобрення. *Зб. наук. пр. УНУС*. 2024. Вип. 104. Ч. 1. С. 8–19. DOI: 10.32782/2415-8240-2024-104-1-8-19
111. Марцинкевич В., Коломієць Н. Поводження з відходами тваринництва: переваги технології анаеробного зброджування. Київ : Національний екологічний центр України, 2015. 24 с.

112. Марчук І. У., Макаренко В. М., Розстальний В. Є. та ін. Добри́ва та їх використання. Київ : Арістей, 2013. 258 с.

113. МВВ 081/12-0006-01. Поверхневі та очищені стічні води. Методика виконання вимірювань масової концентрації кальцію та магнію титриметричним методом : затв. наказом Міністерства екології та природних ресурсів України від 03.09.2002 р. № 336. URL: <https://online.budstandart.com/>.

114. МВВ 081/12-0177-05. Поверхневі та очищені стічні води. Методика виконання вимірювань масової концентрації сульфатів титриметричним методом : затв. та надано чинності Наказом Міністра охорони навколишнього природного середовища України від 21 червня 2005 р. № 219. URL: <https://online.budstandart.com/>.

115. Мельник В. І., Романащенко О. А., Циганенко М. О. та ін. Екологічно безпечне використання мінеральних добрив. *Інженерія природокористування*. 2021. № 1 (23). С. 12–17. <https://doi.org/10.5281/zenodo.6807501>

116. Мельник В., Романащенко О., Циганенко М. та ін. Використання органічних добрив: економічно-екологічні аспекти. *Інженерія природокористування*. 2020. 3(17). С. 29–34.

117. Методика державної науково-технічної експертизи сортів рослин. Методи визначення показників якості продукції рослинництва. Вінниця : ТОВ Ніланд-ЛТД, 2015. 160 с.

118. Методологія оцінювання стійкості сортів пшениці проти шкідників і збудників хвороб; за ред. С. О. Трибеля. Київ, 2007. 392 с.

119. Мірошниченко М. М., Гладкіх Є. Ю., Ревтьє-Уварова А. В., Гетманенко В. А. Напрями удосконалення нормативно- правової бази щодо регулювання безпечності та якості добрив в Україні. *Агрохімія і ґрунтознавство*. 2024. Вип. 96. С. 20–29. <https://doi.org/10.31073/acss96-03>

120. Мовсесов Г. Є., Ляшенко О. О. Основні положення технології біогазового (анаеробного метанового) зброджування органічних відходів: рекомендації. Запоріжжя : ІМТ НААН України, 2010. 29 с.

121. Мостіпан М. І., Умрихін Н. Л., Ковальов М. М. Вміст білка у зерні пшениці озимої залежно від погодних умов у ранньовесняний період. *Зрошуване землеробство*. 2020. Вип. 73. С. 73–79.
122. Надточаев Н. Ф. Кукурудза на полях Белоруси. Минск : ИВЦ Минфина, 2008. 412 с.
123. Наукові основи ефективності використання виробничих ресурсів у різних моделях технологій вирощування зернових культур: монографія. В. Ф. Камінський, В. Ф. Сайко, М. В. Душко, Н. М. Асанішвілі та ін. Київ : Видавничий дім «Вініченко», 2017. 580 с.
124. Науково-методичні засади управління акумуляцією органічної речовини ґрунтів. Є. В. Скрильник, В. А. Гетманенко, А. М. Кутова та ін. Харків : ФОП Бровін О. В., 2020. 96 с.
125. Нестеренко О. В., Колодійчук Л. С. Можливості використання лігніноцелюлозної маси в якості субстрату біогазових установок. Матер. Міжнар. наук.-практ. конф. «Наука і освіта в інтелектуально-інноваційному розвитку суспільства», (16–17 травня 2019 р., м. Бережани). 2019. С. 237–239.
126. Нікітіна А. Біотехнологічні та мікробіологічні аспекти термофільної анаеробної переробки комунальних органічних відходів при високому навантаженні по субстрату : дис. канд. біол. наук. Київ, 2018. 168 с.
127. Новикова А. В. Исследования засоленных и солонцовых почв: генезис, мелиорация, экология. Избранные труды. Харьков : КП «Друкарня № 13», 2009. 720 с.
128. Носко Б. С. Фосфор у ґрунтах і землеробстві України. Харків : ФОП «Бровін О. В.», 2017. 476 с.
129. Орехович О. Біогазова установка для українського споживача. <https://chz.org.ua/wp-content/uploads/2016/04>.
130. Павлюк О. О., Гангур В. В., Лень О. І. Вплив різних систем удобрення на урожайність зерна кукурудзи в умовах недостатнього зволоження лівобережного Лісостепу України. *Бюл. Ін-ту зерн. госп-ва УААН*. 2007. № 30. С. 30–33.

131. Паламарчук В. Д., Поліщук І. С., Єрмакова Л. М., Каленська С. М. Біологія та екологія сільськогосподарських рослин. Вінниця : ФОП Данилюк, 2013. 636 с.

132. Передумови формування якості зерна пшениць та продуктів його перероблення. Г. М. Господаренко, В. В. Любич, І. О. Полянецька, В. В. Новіков, В. В. Желєзна; за заг. ред. Г. М. Господаренка. Київ : ТОВ «СІК ГРУП Україна», 2019. 336 с.

133. Писаренко В. М., Писаренко П. В. Органічні добрива на захисті родючості ґрунту. Монографія. Полтава, 2022. 156 с.

134. Півошенко І. М. Клімат Вінницької області. Вінниця : ВАТ «Віноблдрукарня», 1997. 240 с.

135. Пінчук В. О., Подоба Ю. В., Тертична О. В. та ін. Екологічно безпечні технології переробки побічної продукції тваринного походження з отриманням органічних добрив: науково-методичні рекомендації. Київ : ДІА, 2023. 50 с.

136. Подоба Ю. В., Пінчук В. О. Екологічно безпечні технології переробки побічної продукції тваринного і рослинного походження з отриманням гранульованого органічного добрива. *Матер. всеукр. наук.-практ. конф. «Актуальні питання агротехнологій» присвяченій 100-річчю професора І. М. Карасюка (м. Умань, 23 листопада 2023 р.)*. Умань, 2023. С. 33–35.

137. Поліщук В. М., Лободко М. М., Сидорчук О. В. Поліщук О. В. Вплив режимів метанового бродіння на ефективність виробництва біогазу. *Науковий вісник Національного університету біоресурсів і природокористування*. 2013. № 185. Ч. 3. С. 180–191.

138. Полупан М. І., Соловей В. Б., Величко В. А. Класифікація ґрунтів України. Київ : Аграрна наука, 2005.

139. Польовий В. М., Лукашук Л. Я., Лук'яник М. М. Вплив змін клімату на розвиток рослинництва в умовах західного регіону. *Вісник аграрної науки*. 2019. № 9 (798). С. 29–34.

140. Порядок проведення кваліфікаційної експертизи сорту. Затв. наказом Міністерства аграрної політики та продовольства України 05 липня 2023 року № 1344 <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z1244-23#Text>

141. Постановою Кабінету Міністрів України від 15 грудня 2021 р. за № 1325 «Про затвердження нормативів гранично допустимих концентрацій небезпечних речовин у ґрунтах, а також переліку таких речовин».

142. Пришляк Н. В., Токарчук Д. М., Паламаренко Я. В. Рекомендації з вибору оптимальної сировини для виробництва біогазу на основі експериментальних даних щодо енергетичної цінності відходів. *Інвестиції: практика та досвід*. 2020. № 24. С. 58–66. DOI: <https://doi.org/10.32702/2306-6814.2020.24.58>

143. Прокопенко О. М. Тваринництво України (Animal production of Ukraine). *Статистичний збірник* (State statistics service of Ukraine). Київ, 2019. 166 с.

144. Ратушняк Г. С., Джеджула В. В. Інтенсифікація біоконверсії коливальним перемішуванням субстрату. Вінниця : УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2008. 117 с.

145. Рибіна Л. О. Екологічні аспекти інноваційного розвитку АПК. *Вісник Сумського національного аграрного університету*. 2009. № 2. С. 78–83.

146. Румбах М. Ю. Продуктивність гібридів кукурудзи різних груп стиглості залежно від густоти рослин та фону мінерального живлення. *Бюл. Ін-ту зерн. госп-ва*. 2011. № 40. С. 110–113.

147. Сайко В. Ф. Землеробство в контексті змін клімату. *Збірник наукових праць ННЦ «Інститут землеробства УААН» [спецвипуск]*. Київ : ВД «ЕКМО», 2008. С. 3–14.

148. Скляр О. Г., Скляр Р. В. Аналіз роботи біогазових установок. *Механізація та електрифікація сільського господарства: загальнодержавний збірник*. 2019. Вип. № 10 (109). С. 132–138.

149. Скляр О. Г., Скляр Р. В. Біогазові станції як екологічно безпечний засіб переробки відходів. *Матер. IV міжнар. наук.-практ. конф. «Біоенергетичні системи»*. Житомир, 2020. С. 132–135.

150. Скляр О. Г., Скляр Р. В. Дослідження способів утилізації відходів птахівництва і тваринництва. *Сучасні проблеми та технології аграрного сектору України: зб. наук. пр.* Ніжин, 2019. Вип. 12. С. 298–304.
151. Скляр О. Г., Скляр Р. В. Напрями використання органічних ресурсів у тваринництві. *Праці ТДАТУ*. 2011. Вип. 11. Т. 5. С. 210–217.
152. Скляр О. Г., Скляр Р. В. Властивості біодобрих, що отримуються після анаеробної ферментації гною. *Праці Таврійського держ. агротехнологічного ун-ту*. 2013. Вип. 13. Т. 3. С. 110–117.
153. Скляр О. Г., Скляр Р. В. Теоретичні дослідження режимів і параметрів метантенку біогазової установки. *Науковий вісник ТДАТУ (Електронне наукове фахове видання)*. Мелітополь, 2020. Вип. 10. Т. 1. С. 148–155.
154. Скляр Р. В. Особливості анаеробної ферментації різних видів тваринницьких відходів. *Матеріали IV міжнар. наук.-практ. конф. «Біоенергетичні системи»*. Житомир, 2020. С. 120–123.
155. Скрильник Є. В., Гетьманенко В. А., Кутова А. М., Москалеко В. П. Потенційні ресурси та підходи до управління органічною сировиною України для поповнення запасів гумусу в ґрунтах. *Вісник аграрної науки Причорномор'я*. 2021. Вип. 2. С. 45–53.
156. Скрильник Є. В., Кутова А. М. Еволюція термінів у сфері органічної речовини та гумусу. *Вісник аграрної науки*. 2023. №4 (841). С. 15–23.
157. Таврель М. І. Обґрунтування шляхів подолання евтрофікації водойм. *Проблеми екології*. 2021. № 1 (23). С. 73–79.
158. Теория и практика использования органических удобрений; И. Н. Лозановская, Д. С. Орлов, П. Д. Попов. Москва : Агропромиздат, 1988. 96 с.
159. Тертична О., Пінчук В., Подоба Ю. Сучасні перспективи поводження з побічною продукцією та стічними водами тваринництва. Аграрна наука Західного Полісся. Матер. Всеукр. наук.-пр. інтернет-конф. «Інноваційні шляхи розвитку землеробства в сучасних умовах». Рівне, 2024. С. 91–93.

160. Ткаченко С. Й. Риндюк В. І., Пішеніна Н. В. та ін. Термічна і біотехнологічна нестабільність в реакторі анаеробної переробки відходів. *Вісник Вінницького національного аграрного університету*. 2011. № 7. С. 131–137.
161. Ткачук В., Кільницька О., Яремова М., Лавринюк О. Екологізація аграрного виробництва в умовах сталого розвитку. *Аграрна економіка*. 2024. Т.17. № 1. С. 17–26.
162. Ткачук О. П., Вітер Н. Г. Динаміка кліматичних показників та їх вплив на урожайність основних сільськогосподарських культур у Вінницькій області. *Аграрні інновації*. 2023. № 17. С. 139–149.
163. Токарчук Д. М., Фурман І. В. Сучасні енергоефективні технології в АПК України. *Економіка, фінанси, менеджмент: актуальні питання науки і практики*. 2020. № 4(54). С. 99–116. DOI: 10.37128/2411-4413-2020-4-7.
164. Трус О. М., Господаренко Г. М., Прокопчук І. В. Гумус чорнозему опідзоленого та його відтворення. Умань : РВВ УНУС, 2016. 228 с.
165. Удосконалена діагностика рівня азотного забезпечення ґрунту методами польового та лабораторного тестування, А. В. Ревтьє-Уварова, О. В. Карацюба, В. М. Ніконенко, О. І. Сліденко. Харків : ФОП Бровін О. В., 2020. 94 с.
166. Управління живленням рослин в умовах погодно-кліматичних флуктуацій; за ред. М. М. Мірошниченка і Є. Ю. Гладкіх. Київ : Аграрна наука, 2022. 160 с.
167. Федуняк І. О. Ефективність виробництва біогазу в Україні. *Наукові записки Національного університету «Острозька академія». Серія «Економіка»*. 2014. Вип. 26. С. 45–49.
168. Христенко А. О. Теоретичні проблеми методології балансової оцінки кругообігу макроелементів живлення в системі «добрива–ґрунт–рослина». *Агрохімія і ґрунтознавство*. 2020. Вип. 90. С. 47–56.
169. Цупенко Н. Ф. Справочник агронома по метеорологии. Киев : Урожай, 1990. 240 с.

170. Цуркан М. А. Агрохимические основы применения органических удобрений. Кишенев : Штиинца, 1985. 228 с.

171. Черевко Г., Шугало В. Сфери та переваги застосування біогазу у вирішенні енергетичних проблем. *Аграрна економіка. Серія Економіка природокористування*. 2017. Т. 10, № 3-4. С. 127–132.

172. Чорна Л. В., Господаренко Г. М. Агрофізичні властивості ґрунту, як фактор формування врожаю. *Зб. наук. пр. Уманського держ. агр. університету*. 2003. Спецвипуск. С. 772–777.

173. Шворов С. А., Антипов Є. О. Науково-технічні рекомендації щодо інтенсифікації процесів анаеробного зброджування в реакторах біогазових установок. *Енергетика та автоматика*. 2018. № 3. С. 95–105.

174. Шворов С. А., Комарчук Д. С., Охріменко П. Г., Іванов П. В. Модель системи керування електротехнічним комплексом біогазової установки. *Науковий вісник Національного університету біоресурсів і природокористування України. Серія: Техніка та енергетика АПК*. 2016. Вип. 242. С. 75–84.

175. Шевцова О. Л. Економічна ефективність використання органіномінеральних добрив із побічної продукції тваринного походження. *Збалансоване природокористування*. 2021. № 1. С. 5–12.

176. Шевчук О. В., Господаренко Г. М. Вплив дигестату на якість зерна пшениці та збір білка. *Інноваційні технології у рослинництві: матеріали міжнародної науково-практичної інтернет-конференції до 115-ої річниці з дня народження док. с.-г. н., проф., член-коресп. НАН України, Заслуженого діяча науки України Кияка Г. С. (Львів-Дубляни, 30 квітня 2025 р.)*. [Електронний ресурс]. Львів-Дубляни: Львівський НУВМБ ім. С. З. Гжицького. Півн. кампус, 2025. С. 159–162.  
<https://repository.lnup.edu.ua/jspui/handle/123456789/2477>

177. Шевчук О. В., Господаренко Г. М. Основні характеристики супутніх продуктів виробництва біогазу з курячого посліду. *Матеріали Міжнар. н.-п. конф. з нагоди 100-річчя від дня народження д. с.-г. н., проф., академіка Ф. Т.*



*Моргуна, 90-річчя Агрономічного факультету ДДАЕУ та Міжнародного дня здоров'я рослин* (Дніпро, 16–17 травня 2024 року). Дніпро: ДДАЕУ, 2024. С. 82–84.

178. Шевчук О. В., Господаренко Г. М. Використання рідкого дигестату біогазового виробництва для підживлення пшениці озимої. *Зб. наук. пр. Уманського НУС*. 2023. Вип. 103. Ч. 1. С. 18–26. DOI: 10.32782/2415-8240-2023-103-1-18-26.

179. Шевчук О. В., Господаренко Г. М. Ефективність удобрення пшениці озимої і кукурудзи дигестатом. *Зб. пр. учасників Міжнар. наук.-практ. конф. «Інноваційні технології в рослинництві та землеробстві»*. (Житомир, 3–4 квітні 2025 р.). Житомир, 2025. С. 90–96.

180. Шевчук О. В., Господаренко Г. М. Ефективності застосування дигестату для удобрення польових культур. *Зб. тез Міжнар. наук.-практ. конф. «Адаптація агровиробництва до змін клімату та ґрунтової родючості»* (с-ще Полігон, Миколаївської обл., 9 жовтня 2025 р.). ДУ «Миколаївська державна с.-г. дослідна станція ІКОСГ НААН», 2025. С. 90–92.

181. Шевчук О. В., Господаренко Г. М. Основні характеристики біогазового дигестату з курячого посліду. *Зб. наук. пр. Уманського НУС*. 2024. Вип. 104. Ч. 1. С. 19–32. DOI: 10.32782/2415-8240-2024-104-1-19-32.

182. Шевчук О. В., Господаренко Г. М. Перспективи використання супутніх продуктів виробництва біогазу в сучасних агротехнологіях. *Тези Міжнар. наук.-практ. конф., яка присвячена 100-річчю проф. М. К. Шикuli «Ґрунтозахисні технології як фактор родючості ґрунтів і високих врожайів»*. (Київ, 20–21 лютого 2025 р.). Київ, 2025. С. 86–88.

183. Шевчук О. В., Господаренко Г. М. Порівняльна характеристика дигестату з іншими органічними добривами. *Вісник Уманського НУС*. 2025. №1. С. 42–48. DOI <https://doi.org/10.32782/2310-0478-2025-1-42-48>

184. Шевчук О. Баланс основних елементів живлення в ґрунті під пшеницею озимою за різних доз внесення дигестату. *Тези Всеукр. наук.-практ. інтернет-конференції «Рубіновські читання», приуроченій 125-річчю від дня народження*

видатного вченого, професора Симона Самійловича Рубіна. (Умань, 16 травня 2025 р.). Умань, 2025. С. 16–17.

185. Шевчук М. Й., Веремєєнко С. І., Лопушняк В. І. Агрохімія. Частина І. Теоретичні основи формування врожаю. Луцьк : Надстир'я, 2012. 194 с.

186. Шевчук О. В., Господаренко Г. М. Ефективність дигестату в системі удобрення кукурудзи. *Зб. наук. пр. Уманського НУС*. 2025. Вип. 106. Ч. 1. С. 189–197. DOI: 10.32782/2415-8240-2025-106-1-189-197

187. Шевчук О. В., Господаренко Г. М. Ефективність підживлення пшениці озимої дигестатом. *Таврійський науковий вісник*. 2025. Вип. 142. Ч. 2. С. 160–168. DOI <https://doi.org/10.32782/2226-0099.2025.142.2.20>

188. Шкарда М. Производство и применение органических удобрений. Пер. с чеш. З. К. Благовещенской. Москва : Агропромиздат, 1985. 364 с.

189. Шувар І. А., Сендецький В. М., Бунчак О. М., Гнидюк В. С., Тимофійчук О.Б. Виробництво та використання органічних добрив. Івано-Франківськ: Симфонія форте, 2015. 596 с.

190. Эдер Б., Шульц Х. Биогазовые установки. Практическое пособие. Перевод с немецкого выполнен компанией Zorg Biogas в 1996 г. (<http://www.zorg-biogas.com>). 2008. 268 с.

191. Як у біогазових установках добриво виробляють. URL: <https://propozitsiya.com/ua/yak-u-biogazovyh-ustanovkah-dobryvo-vyroblyayut>.

192. Abbasi T., Tauseef S. M., Abbasi S. A. A brief history of anaerobic digestion and «biogas». In *Biogas energy*. New York : Springer, 2012. P. 11–23.

193. Abis L., Loubet B., Ciuraru R. et al. Reduced microbial diversity induces larger volatile organic compound emissions from soils. *Scientific Reports*. 2020. №10. P. 1–15. DOI: 10.1038/s41598-020-63091-8.

194. Abubaker J., Elnesairy N., Ahmad S. Effects of non-digested and anaerobically digested farmyard manures on wheat crop cultivated in desert soil. *Journal of Arid Land*. 2017. №3. P. 1–10.

195. Abubaker J., Risberg K., Jönsson E. et al. Short-term effects of biogas digestates and pig slurry application on soil microbial activity. *Applied and*

Environmental Soil Science. 2015. Available:  
<https://www.hindawi.com/journals/aess/2015/658542/>.

196. Adamovics A., Millers J. Innovative digestate and wood ash mixtures production technology and the effect of mixtures on the productivity of winter wheat.: матеріали Міжн. наук. конф. 24 жовтня 2023 р. Вінниця : ТОВ «ТВОРИ». С. 7–10.

197. Adamovičs A., Poiša L. The Efficiency of Using Innovative Soil Liming and Fertilizer Means in Winter Wheat Sowings. Sustainable Food Industry. 2025. V. 1. №. 1. P. 26–40. <https://doi.org/10.17770/sfi2025.1.1.8375>

198. Albuquerque J. A., Fuente C., Ferrer-Costak A. et al. Assessment of the fertiliser potential of digestates from farm and agroindustrial residues. Biomass Bioenergy. 2012. №40. P. 181–189.

199. Alexandratos N., Bruinsma J. World Agriculture towards 2030/2050: The 2012 Revision; ESA Working Paper № 12-03; Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO): Rome, Italy, 2012.

200. Alghoul O., El-Hassan Z., Ramadan M., Olabi A. G. Experimental investigation on the production of biogas from waste food. Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects. 2019. 41(17). P. 2051–2060. DOI: 10.1080/15567036.2018.1549156.

201. Alhameid A., Tobin C., Maiga A. et al. Intensified agroecosystems and changes in soil carbon dynamics. In Soil Health and *Intensification* of Agroecosystems; Academic Press: Cambridge, MA, USA, 2017. P. 195–214.

202. Andriienko O., Vasytkovska K., Andriienko A., Vasytkovskyi O. Choosing the optimal elements of corn cultivation technology in the conditions of Ukraine. Bulgarian Journal of Agricultural Science. 2024. 30(4). P. 702–711. (URL: <https://www.agrojournal.org/30/04-19.pdf>).

203. Anukam A., Mohammadi A., Naqvi M., Granström K. A Review of the Chemistry of Anaerobic Digestion: Methods of Accelerating and Optimizing Process Efficiency. Processes. 2019. 7. 504. <https://doi.org/10.3390/pr7080504>.

204. Arncken C., Mäder P., Mayer J., Weibel F. Sensory, yield and quality differences between organically and conventionally grown winter wheat. *Journal of the Science of Food and Agriculture*. 2018. 92 (14). P. 2819–2825. DOI: 10.1002/jsfa.5784.
205. Bachmann S., Wentzel S., Eichler-Lobermann B. Codigested dairy slurry as a phosphorus and nitrogen source for *Zea mays* L. and *Amaranthus cruentus* L. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*. 2011. 174(6). P. 908–915. DOI: 10.1002/jpln.201000383.
206. Bahuguna A., Sharma S., Yadav J. Effect of different organic sources on physical, chemical and biological properties of soil in inceptisols of Varanasi. *Int. J. Plant Soil Sc.* 2021. 33. P. 41–52.
207. Baksinskaite A., Doyeni M. O., Tilvikiene V. Influence of *Artemisia dubia* Wall and Pig Manual Digestate on Winter Wheat Productivity and Grain Quality. *Agriculture*. 2024. 14. 1819. <https://doi.org/10.3390/agriculture14101819>.
208. Barlóg P., Hlisnikovský L., Kunzová E. Effect of digestate on soil organic carbon and plant-available nutrient content compared to cattle slurry and mineral fertilization. *Agronomy*. 2020. 10(3). 379. DOI: 10.3390/agronomy10030379.
209. Bekele M., Getaneh S. Function of Microorganisms on Soil Health Maintenance: A Review Article. *Int. J. Adv. Res. Biol. Sci.* 2022. № 9(4). P. 82–93. <http://dx.doi.org/10.22192/ijarbs>.
210. Bender R. R., Haegerle J. W., Ruffo M. L., Below F. E. Nutrient uptake, partitioning, and remobilization in modern, transgenic insect-protected maize hybrids. *Agron J.* 2013. 105. P. 161–170. [doi.org/10.2134/agronj2012.0352](https://doi.org/10.2134/agronj2012.0352).
211. Bhatt A. H., Tao L. Economic perspectives of biogas production via anaerobic digestion. *Bioengineering*. 2020. 7(3). DOI: 10.3390/bioengineering7030074.
212. Bhowmik A., Fortuna A., Cihacek L. J. et al. Potential carbon sequestration and nitrogen cycling in long-term organic management systems. 2017. 32. P. 498–510. DOI:10.1017/S1742170516000429.
213. Biesiekierski J. R. What Is Gluten? *J. Gastroenterol. Hepatol.* 32 (Suppl. S1). 2017. P. 78–81. DOI: 10.1111/jgh.13703.

214. Biogas Digest. Volume II. Biogas – Application and Product Development. Information and Advisory Service on Appropriate Technology. GTZ. <http://www.gtz.de/de/dokumente/en-biogas-volume2.pdf>.

215. Bloem E., Albiñ A., Elving J. et al. Contamination of organic nutrient sources with potentially toxic elements, antibiotics and pathogen microorganisms in relation to P fertilizer potential and treatment options for the production of sustainable fertilizers: A review. *Sci. Total Environ.* 2017. 607–608. P. 225–242.

216. Borowski S., Boniecki P., Kubacki P., Czyżowska A. Food waste co-digestion with slaughterhouse waste and sewage sludge: digestate conditioning and supernatant quality. *Waste Management.* 2018. №74. P. 158–167. DOI: 10.1016/j.wasman.2017.12.010.

217. Brożyna M. A., Petersen S. O., Chirinda N., Olesen J. E. Effects of grass-clover management and cover crops on nitrogen cycling and nitrous oxide emissions in a stockless organic crop rotation. *Agric. Ecosyst. Environ.* 2013. 181. P. 115–126. DOI:10.1016/j.agee.2013.09.013.

218. Buysse P., Roisin C., Aubinet M. Agriculture, Ecosystems and Environment Fifty years of contrasted residue management of an agricultural crop: Impacts on the soil carbon budget and on soil heterotrophic respiration. 2013. 167. P. 52–59.

219. Cao Y., Wang J., Wu H. et al. Soil chemical and microbial responses to biogas slurry amendment and its effect on Fusarium wilt suppression. *Applied Soil Ecology*, 2016. № 107. DOI: 10.1016/j.apsoil.2016.05.010.

220. Cela S., Santiveri F., Lloveras J. Residual effects of pig slurry and mineral nitrogen fertilizer on irrigated wheat. *European Journal of Agronomy.* 2011. 34(4). P. 257–262.

221. Chandna P., Khurana M., Ladha J. K. et al. Spatial and seasonal distribution of nitrate-N in groundwater beneath the rice–wheat cropping system of India: a geospatial analysis. *Environmental monitoring and assessment.* 2011. 178. P. 545–562. Available at: <https://doi.org/10.1007/s10661-010-1712-0>

222. Chang X., He H., Cheng L. et al. Combined application of chemical and organic fertilizers: effects on yield and soil nutrients in spring wheat under drip irrigation. *Agronomy*. 2024. 14. 655. [https:// doi.org/10.3390/agronomy14040655](https://doi.org/10.3390/agronomy14040655)
223. Chen N. L., Mao H. H., Chen S. J. et al. Effect of biogas slurry foliar spraying on leaf photosynthesis characteristics, fruit yield and quality of pepino in greenhouse. *China Cucurbits and Vegetables*. 2021. №. 34(04). P. 88–93.
224. Chiew Y. L., Spångberg J., Baky A. et al. Environmental impact of recycling digested food waste as a fertilizer in agriculture – A case study. *Resources, Conservation and Recycling*. 2015. 95. P. 1–14.
225. Chiriță S., Rusu T., Urdă C. et al. Winter wheat yield and quality depending on chemical fertilization, different treatments and tillage systems. *AgroLife Scientific Journal*. 2023. V. 12. №1.
226. Chloupeka O., Hrstkova P., Schweigertb P. Yield and its stability, crop diversity, adaptability and response to climate change, weather and fertilisation over 75 years in the Czech Republic in comparison to some European countries. *Field Crops Research*. 2004. 85. P. 167–190 DOI:10.1016/S0378-4290(03)00162-X.
227. Chojnacka K., Moustakas K., Witek-Krowiak A. Bio-based fertilizers: A practical approach towards circular economy. *Bioresour. Technol.* 2020. 295. 122223.
228. Cissé A., Bah H., Hu Y. Contrasting impacts of the 2-year application of biofertilizers and organic manure on grain yield of winter wheat summer maize cropping system in North China Plain. *African Journal of Agricultural Research*. 2024. V. 20(12). P. 1023–1035. DOI: 10.5897/AJAR2024.16764.
229. Comparetti A., Febo P., Greco C., Orlando S. Current state and future of biogas and digestate production. *Bulgarian Journal of Agricultural Science*. 2013. 19. P. 1–14.
230. Coque M, Gallais A. Genetic Variation for Nitrogen Remobilization and Post silking Nitrogen Uptake in Maize Recombinant Inbred Lines: Heritability's and Correlations among Traits. *Crop Science*. 2007. 47. P. 1787–1796. [doi.org/10.2135/cropsci2007.02.0096](https://doi.org/10.2135/cropsci2007.02.0096).

231. Corden C., Bougas K., Cunningham E. et al. Digestate and Compost as Fertilizers: Risk Assessment and Risk Management Options. Wood Environment & Infrastructure Solutions UK Limited; Aberdeen, UK. 2019. [https://ec.europa.eu/environment/chemicals/reach/pdf/40039\\_Digestate\\_and\\_Compost\\_RMOA-Final\\_report\\_i2\\_20190208.pdf](https://ec.europa.eu/environment/chemicals/reach/pdf/40039_Digestate_and_Compost_RMOA-Final_report_i2_20190208.pdf).

232. Cui J., Zhu R., Wang X. et al. Effect of high soil C/N ratio and nitrogen limitation caused by the long-term combined organic-inorganic fertilization on the soil microbial community structure and its dominated SOC decomposition. *J. Environ. Manage.* 2022. 303. 114155, DOI:10.1016/j.jenvman.2021.114155.

233. Cui Y. X., Azeem M., Sun J. C. et al. Effects of Biogas Slurry Combined with Chemical Fertilizer on Soil Chemical Properties and Corn Yield and Quality. *Shandong Agricultural Sciences*. 2020. № 52(05). P. 77–81.

234. Czekala W., Lewicki A., Pochwatka P. et al. Digestate management in polish farms as an element of the nutrient cycle. *J. Clean. Prod.* 2020. 242. DOI:10.1016/j.jclepro.2019.118454.

235. Danylyshyn V., Koval M. Analysis of biogas production and prospects for the development of biogas technologies in Ukraine. *Ukrainian Black Sea Region Agrarian Science*. 2023. V. 27, № 3. P. 90–102. DOI: 10.56407/bs.agrarian/3.2023.90.

236. Datsko O., Zakharchenko E. Influence of biofertilizers and soil cultivation systems on corn grain quality and their correlation. *Science, Technology and Innovation in the Context of Global Transformation*. 2024. <https://doi.org/10.30525/978-9934-26-499-3-2>.

237. Dere A.J., Kalbande S.R., Khambalkar V. P. Recent review on biogas production from different waste. *International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences*. 2017. 6(10).P.3452–3457. DOI: 10.20546/ijcmas.2017.610.407.

238. Deria A. M., Bell R. W., O'Hara G. W. Organic wheat production and soil nutrient status in a Mediterranean Climatic Zone. *Journal of Sustainable Agriculture*. 2013. 21 (4). P. 21–47. DOI: 10.1300/J064v21n04\_04.

239. Devi M. K., Manikandan S., Oviyapriya M. et al. Recent advances in biogas production using Agro-Industrial Waste: A comprehensive review outlook of



Techno-Economic analysis. *Bioresource Technology*. 2022. 363. 127871. DOI: 10.1016/j.biortech.2022.127871.

240. Djalovic I., Riaz M., Akhtar K. et al. Yield and Grain Quality of Divergent Maize Cultivars under Inorganic N Fertilizer Regimes and Zn Application Depend on Climatic Conditions in Calcareous Soil. *Agronomy*. 2022. V. 12(11). 2705.

241. Dong J. J., Ying X. C., Xu J. et al. Effect of chemical fertilizers substitution by biogas slurry on the growth of rice. *An-hui Agricultural Science Bulletin*. 2017. № 23(04). P. 39–41.

242. Doyeni M. O., Barcauskaite K., Buneviciene K. et al. Nitrogen flow in livestock waste system towards an efficient circular economy in agriculture. *Waste Management & Research*. 2022. 41(3). P. 701–712. DOI: 10.1177/0734242X221123484.

243. Doyeni M. O., Stulpinaite U., Baksinskaite A. et al. The Effectiveness of Digestate Use for Fertilization in an Agricultural Cropping System. *Plants (Basel)*. 2021. 10(8). DOI: 10.3390/plants10081734.

244. Doyeni M. O., Stulpinaite U., Baksinskaite A. et al. Greenhouse gas emissions in agricultural cultivated soils using animal waste-based digestates for crop fertilization. *Journal of Agricultural Science*. 2021. 159(1–2). P. 23–30. DOI: 10.1017/S0021859621000319.

245. Dubrovskis V., Adamovics A. *Bioenerģijas horizonti*. Jelgava. 2012. 352 p.

246. Dușa E. M., Vasile M., Stanciu A-M. et al. Vasilica stan yield and grain quality of winter wheat under short-term organic and mineral fertilization in a sylvosteppe area from Romania. *Scientific Papers. Series A. Agronomy*. 2024. V. LXVII. № 2. P. 209–215.

247. Dychko A., Remez N., Opolinskyi I. et al. Modelling of two-stage methane digestion with pretreatment of biomass. *Latvian journal of physics and technical sciences*. 2018. № 2. P. 37–44.

248. Dymchuk A., Shcherbatiuk N., Pustova N. et al. Bioconversion of livestock by-products into biogas: Experimental study of optimal fermentation conditions. *Scientific Horizons*. 2025. 28(3). P. 80–89.



249. Dynarski K. A., Bossio D. A., Scow K. M. Dynamic Stability of Soil Carbon: Reassessing the «Permanence» of Soil Carbon Sequestration. *Frontiers in Environmental Science*. 2020. № 13. P.13–25. DOI: 10.3389/fenvs.2020.514701.
250. Ehmann A., Thumm U., Lewandowski I. Fertilizing Potential of Separated Biogas Digestates in Annual and Perennial Biomass Production Systems. 2018. 2. P. 1–14. DOI:10.3389/fsufs.2018.00012.
251. Esposito G., Frunzo L., Panico A., Pirozzi F. Enhanced bio-methane production from co-digestion of different organic wastes. *Environ. Technol.* 2012. 33(24). P. 2733–2740.
252. Estoppey N., Castro G., Slinde G.A. et al. Exposure assessment of plastics, phthalate plasticizers and their transformation products in diverse bio-based fertilizers. *Sci. Total Environ.* 2024. 918. 170501.
253. European Biogas Association. (2020). EBA annual report 2020. <https://www.europeanbiogas.eu/eba-annual-report-2020/>.
254. European Commission. Circular Economy Action Plan. The EU's New Circular Action Plan Paves the Way for a Cleaner and More Competitive Europe. Available online: [https://environment.ec.europa.eu/strategy/circular-economy-action-plan\\_en](https://environment.ec.europa.eu/strategy/circular-economy-action-plan_en).
255. Evans S. D., Goodrich P. R., Munter R. C., Smith R. E. Effects of solid and liquid beef manure and liquid hog manure on soil characteristics and on growth, yield, and composition of corn<sup>1</sup>. *Journal of Environmental Quality*. 1977. 6(4). P. 361–368.
256. Ezemagu I. G., Ejimofor M. I., Menkiti M. C., Diyoke C. Biofertilizer production via composting of digestate obtained from anaerobic digestion of post biocoagulation sludge blended with saw dust : Physiochemical characterization and kinetic study. *Environ. Challenges*. 2021. 5. 100288. DOI:10.1016/j.envc.2021.100288.
257. Fahad S., Sönmez O., Saud S. et al. Plant growth regulators for climate-smart agriculture., First Edn. Boca Raton, FL: CRC Press, 2021. 224 p. DOI: 10.1201/9781003109013.

258. Feng W., Guan T., Wang Y. H. et al. Effects of combined application of biogas slurry and urea on photosynthetic characteristics and grain yield of winter wheat. *Journal of Crop Science*. 2010. 36(8). P. 1401–1408.
259. Feng W., Hou C. C., Liu D. Y. et al. Effects of combined application of biogas slurry and chemical fertilizer on grain quality characters and yield of winter wheat. *Journal of Triticeae Crops*. 2013. 33(03). P. 520–525.
260. Gan F. D., Wei S. Q., Tan W. N. et al. Effect of biogas slurry on tabe bean quality and soil fertility. *CHINA BIOGAS*. 2011. 29(1). P. 59–60.
261. Gao W., Tao X. T., Wang Y. L. et al. Effects of combined applications of pig farm slurry and chemical fertilizer on medium- and micro-element contents and quality of wheat. *Chinese Journal of Applied Ecology*. 2014. № 25(02). P. 433–440.
262. Giacometti C., Mazzon M., Cavani L. et al. A nitrification inhibitor, nitrapyrin, reduces potential nitrate leaching through soil columns treated with animal slurries and anaerobic digestate. *Agronomy*. 2020. 10(6). 865.
263. Global Forum for Food and Agriculture – GFFA 2022 <https://www.gffa-berlin.de>.
264. Golub N., Kozlovets O. Technology of anaerobic-aerobic purification of wastewater from nitrogen compounds after obtaining biogas. *Eastern-European journal of enterprise technologies*. 2016. V. 10. № 3. P. 35–40.
265. Grzebisz W. Technology of Crop Plants Fertilization–Yield Physiologu. Part II. Cereals and Maize. PWRiL: Poznań, Poland, 2012. 279 p.
266. Gupta R., Sharma V., Shrma K. Increase the yield of paddy and wheat with the application of biogas slurry. *Progressive Farming*. 2002. 39(10). P. 22–24.
267. Haegele J. W., Cook K. A., Nichols D. M., Below F. E. Changes in nitrogen use traits associated with genetic improvement for grain yield of maize hybrids released in different decades. *Crop Sci*. 2013. 53. P. 1256–1268. DOI: 10.2135/cropsci2012.07.0429.
268. Häfner F., Ruser R., Class-Mahler I., Möller K. Field Application of Organic Fertilizers Triggers N<sub>2</sub>O Emissions From the Soil N Pool as Indicated by <sup>15</sup>N-

Labeled Digestates. *Frontiers in Sustainable Food Systems*. 2021. 4. DOI: 10.3389/fsufs.2020.614349.

269. He S. M., Ye B. C., Jiang S. Y. Biogas fertilizer application in rice field. *China Biogas*. 2005. 3. P. 50–51.

270. Heletukha H. H., Kucheruk P. P., Matvieiev Yu. B. Perspektyvy vyrobnytstva biometanu v Ukraini [Prospects of biomethane production in Ukraine]. *Analychna zapyska UABIO – Analytical note UABIO*. 2022. 29. Retrieved from: <https://uabio.org/wp-content/uploads/2022/09/UA-Position-paper-UABIO-29.pdf>.

271. Hjorth M., Christensen K. V., Christensen M. L., Sommer S. G. Solid-liquid separation of animal slurry in theory and practice. *Agronomy for Sustainable Development*. 2010. 30. P. 153–180.

272. Hlisnikovský L., Kunzová E. Effect of mineral and organic fertilizers on yield and technological parameters of winter wheat (*Triticum aestivum* L.) on illimerized luvisol. *Polish Journal of Agronomy*. 2014. V. 17. P. 18–24.

273. Holík L., Hlisnikovský L., Kunzová E. The effect of mineral fertilizers and farmyard manure on winter wheat grain yield and grain quality. *Plant Soil Environ*. 2018. 64. P. 491–497. <https://doi.org/10.17221/342/2018-PSE>

274. Horváth I. S., Tabatabaei M., Karimi K., Kumar R. Recent updates on biogas production - a review. *Biofuel Research Journal*. 2016. V. 3. Iss. 2. P. 394–402.

275. Hospodarenko H. M., Liubych V. V. Formation of yield and quality of winterdurum wheat grain depending on long-term fertilization. In 28th International ScientificConference Research for Rural Development, 18–19 May 2022. V. 37 (Jelgava: LatviaUniversity of Life Sciences and Technologies). 2022. P. 13–20. DOI: 10.22616/rrd.28.2022.002.

276. Hryhoriv Ya. Ya., Butenko A. O., Moisiienko V. V. et al. Photosynthetic activity of *Camelina sativa* plants depending on technological measures of growing under conditions of Precarpathians of Ukraine. *Modern Phytomorphology*. 2021. 15. 2–2.

277. Huang H. Y., Cao J. L., Chang Z. Z., Cao Y. Effects of digested pig slurry application on yields, nitrogen and phosphorous up takes by rice and wheat. *Soils*. 2013. № 45(03). P. 412–418.

278. Hussain F., Bronson K. F., Yadvinder S. et al. Use of Chlorophyll Meter Sufficiency Indices for Nitrogen Management of Irrigated Rice in Asia. *Agron. J.* 2000. 92. P. 875–879.

279. IEA Bioenergy Task 37-Country report summaries 2019. IEA Bioenergy. [Online] [https://www. ieabioenergy.com/wp-content/uploads/2020/03/IEA-Task-37-Country-Report-Summaries-2019-1.pdf](https://www.ieabioenergy.com/wp-content/uploads/2020/03/IEA-Task-37-Country-Report-Summaries-2019-1.pdf) [Accessed: 2023-12-11].

280. IUSS Working Group WRB. 2022. World Reference Base for Soil Resources. International soil classification system for naming soils and creating legends for soil maps. 4th edition. International Union of Soil Sciences (IUSS), Vienna, Austria. URL: [https://eurasian-soil-portal. info/wp-content/uploads/2023/02/ wrb\\_fourth\\_edition\\_2022-12-18. pdf](https://eurasian-soil-portal.info/wp-content/uploads/2023/02/wrb_fourth_edition_2022-12-18.pdf).

281. Jarell W. M., Beverly R. B. The dilution effect in plant nutrition studies. *Advances in Agronomy*. 1981. №34. P. 197–224

282. Jia L. L., Zhao J. Q., Yang C. L. et al. Effect of Topdressing Biogas Fertilizer on Growth, Yield and Quality of Tomato. *Acta Agriculturae Boreali-Occidentalis Sinica*, 2017. № 26(06). P. 897–905.

283. Jian Z., Fei Y., Biao M. et al. Using Biogas Slurry to Regulate Growth, Field and Fruit Quality of Greenhouse Tomato and Nitrogen Dynamics in Root Zone. *Journal of Irrigation and Drainage*. 2019. 38(07). P. 23–31.

284. Jodaugienė D., Sinkevičienė A., Adamavičienė A. et al. Organinių mulčių poveikis dirvožemio savybėms. *Žemės ūkio mokslai*. 2016. 23(3). P. 114–122.

285. Johansen A., Carter M. S., Jensen E. S. et al. Effects of digestate from anaerobically digested cattle slurry and plant materials on soil microbial community and emission of CO<sub>2</sub> and N<sub>2</sub>O. *Applied Soil Ecology*. 2013. 63. P. 36–44. DOI: 10.1016/j.apsoil.2012.09.003.

286. Johansen A., Nielsen H. B., Hansen C. M. et al. Survival of weed seeds and animal parasites as affected by anaerobic digestion at meso- and thermophilic

conditions. Waste Management. 2013. 33 P. 807–812. DOI: 10.1016/J.WASMAN.2012.11.001.

287. Jokubauskaitė I., Šlepetienė A., Karčauskienė D. Organinė anglis ir kiti svarbūs makroelementai rūgščiame ir kalkintame dirvožemyje. *Žemės Ūkio Moksl.* 2014. 21. P. 133–141. DOI:10.6001/zemesukiomokslai.v21i3.2963.

288. 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*. 2020. V. XI, Summer, № 3 (43). P. 513–522. DOI: [https://doi.org/10.14505//jemt.v11.3\(43\).02](https://doi.org/10.14505//jemt.v11.3(43).02).

289. Kaletnik H. M., Palamarchuk V. D., Honcharuk I. V. et al. Prospects for the use of corn for energy-efficient and ecologically safe development of rural areas. Monograph. Vinnytsia, 2021. 260 p.

290. Kang L. Y., Zhao Y. Z., Qu M. S., Chen Q. Effects of biogas waste on solanaceae vegetable growth and soil nutrient accumulation in greenhouse. *China Vegetables*. 2011. №1. P. 57–62.

291. Karimi B., Sadet-Bourgeteau S., Cannavacciuolo M. et al. Impact of biogas digestates on soil microbiota in agriculture: a review. *Environmental Chemistry Letters*. 2022. 20. P. 3265–3288. DOI: 10.1007/s10311-022-01451-8.

292. Karimi F., Sultana S., Shirzadi Babakan, A., Royall D. Land Suitability Evaluation for Organic Agriculture of Wheat Using GIS and Multicriteria Analysis. *Papers in Applied Geography*. 2018. 4 (3). P. 326–342. DOI: 10.1080/23754931.2018.1448715.

293. Khan I., Jamal A., Mihoub A. et al. Partial Substitution of Chemical Fertilizers with Organic Supplements Increased Wheat Productivity and Profitability under Limited and Assured Irrigation Regimes. *Agriculture*. 2022. 12(11). 1754. <https://doi.org/10.3390/agriculture12111754>.

294. Kharchenko O., Petrenko S., Sobko M. et al. Models of quantitative estimation of sowing density effect on maize yield and its dependence on weather conditions. *Scientific papers. Series A. Agronomy*. 2021. V. LXIV. № 2. P. 224–231.

295. Kharchenko O., Zakharchenko E., Kovalenko I. et al. On problem of establishing the intensity level of crop variety and its yield value subject to the environmental conditions and constraints. *AgroLife Scientific Journal*, 2019. № 8(1). P. 113–119.
296. Kong D. J., Liu N. N., G. H. Y., Feng Y. Z., Ren G. X. Characteristic and Grain Yield in Winter Wheat of Semi-arid Area of China. *Acta Agriculturae Boreali Occidentalis Sinica*. 2009. № 18(01). P. 117–122.
297. Koszel M., Lorencowicz E. Agricultural use of biogas digestate as a replacement fertilizers. *Agriculture and Agricultural Science Procedia*. 2015. 7. P. 119–124. DOI: 10.1016/j.aaspro.2015.12.004.
298. Kougias P. G., Boe K., O-Thong S. et al. Anaerobic digestion foaming in full-scale biogas plants: A survey on causes and solutions. *Water Science and Technology*. 2014. 69(4). P. 889–895. DOI: 10.2166/wst.2013.792.
299. Kucher O., Hutsol T., Glowack, S. et al. Energy potential of biogas production in Ukraine. *Energies*. 2022. 15(5). 1710. DOI: 10.3390/en15051710.
300. Kulkarni S., Goswami A. Effect of excess fertilisers and nutrients: A review on impact on plants and human population. *Proceedings of international conference on sustainable computing in science, technology and management (SUSCOM)*. 2019. P. 2094–2099. Jaipur: Amity University Rajasthan.
301. Lachutta K., Jankowski K. J. The quality of winter wheat grain by different sowing strategies and nitrogen fertilizer rates: A case study in northeastern. Poland. *Agriculture*. 2024. 14. 552. <https://doi.org/10.3390/agriculture14040552>.
302. Ladha J. K., Tirol-Padre A., Reddy C. K. et al. Global nitrogen budgets in cereals: A 50-year assessment for maize, rice, and wheat production systems. *Sci. Rep.* 2016. 6. P. 1–9. DOI:10.1038/srep19355.
303. Le Guillou C., Angers D. A., Maron P. A. et al. Linking microbial community to soil water-stable aggregation during crop residue decomposition. *Soil Biology and Biochemistry*. 2012. 50. P. 126–133. DOI: 10.1016/j.soilbio.2012.03.009.

304. Leschuk N. V., Orlenko N. S., Khareba O. V., Dydiv O. J. The use of grouping morphological characteristics of Lettuce varieties *L. var. capitata* for the difference test in Ukraine. *Intern. Journal of Botany Studies*. 2020. V. 5, Iss. 6. P. 516–522.
305. Li H., Luo N., Ma J. et al. Research progress on the impact of biogas slurry irrigation on soil and environment of farmland. *Journal of Zhejiang Agricultural Sciences*. 2019. № 60(08). P. 1317–1321.
306. Li L. X., Liu J. M., Huang X. L. et al. Response characteristic of *Cinnamomum migao* seedling's photosynthesis to CO<sub>2</sub> in different conditions of nitrogen. *Journal of Northeast Agricultural University*. 2017. № 48(02). P. 29–36.
307. Li R., Yu X. B., Gao L. et al. Effects of Biogas Slurry on Photosynthesis Output of Balsam Pears. *China Biogas*, 2017. № 35(02). P. 110–114.
308. Li X., Yun S., Zhang C. et al. Application of nano-scale transition metal carbides as accelerants in anaerobic digestion. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2018. 43. P.1926–1936.
309. Li Y. Q., Lin Z. A., Wen Y. C. et al. Effects of combined application of chemical fertilizers with different sources of organic manure on the grain quality of winter wheat. *Plant Nutrition and Fertilizer Sc.* 2016. № 22(06). P. 1513–1522.
310. Li Y. Q., Seng K., Peng S. J. et al. Effects of biogas slurry on wheat yield and the physical and chemical properties of soil. *Chinese Agricultural Science Bulletin*. 2014. 30(12). P. 181–186.
311. Liu W. K., Yang Q.-C., Du L. Soilless cultivation for high-quality vegetables with biogas manure in China: Feasibility and benefit analysis. *Renewable Agriculture and Food Systems*, 2009. № 24(4). P. 300–307. DOI: 10.1017/S1742170509990081.
312. Liu X. G., Li B. Z., Zhang L. S. et al. Effect of biogas slurry on fruit quality and leaf physiological activity index of Fuji apple. *Acta Agric Boreali-Occident Sin*, 2007. № 03. P. 105–108.
313. Lohosha R., Palamarchuk V., Krychkovskyi V., Belkin I. An advanced European overview of the bioenergy efficiency of using digestate from biogas



plants when growing agricultural crops. *Polityka Energetyczna*. 2024. V. 27. Iss. 1. P. 5–26. DOI: <https://doi.org/10.33223/epj/170758>.

314. Lone A. Le diagnostic foliare. Un test meconnu. *Agromais*. 1984. V. 25. P. 22–24.

315. Lu L. Y., Luo A.H., Xie K. Z., Wang Y. H. Effect of Biogas Slurry on Photosynthetic Parameters and Storage Quality of Longshu № 5 Potato. *China Biogas*, 2011. № 29(03). P. 28–30.

316. MacFarlane D. R., Cherepanov P. V., Choi J. et al. A Roadmap to the Ammonia Economy. *Joule*. 2020. 4. P. 1186–1205.

317. Makádi M., Tomócsik A., Orosz V. Digestate: a new nutrient source-review. *Biogas*. 2012. V. 14. P. 295–312.

318. Manojlović M., Kovačević D., Čabilovski R. et al. Organic fertilizers as a source of microelements and potentially toxic elements. [In:] *Proceedings of the 6<sup>th</sup> International Scientific Meeting, the International Soil Science Symposium on Soil Science & Plant Nutrition*, Samsun, Turkey, 18–19 December, 2021. P. 127–133.

319. Mao X. Y., Wu J., Meng X. X. et al. Effects of Biogas Slurry on Yield, Quality and Control on the Disease and Pest of Leaf Mustard. *Acta Agriculturae Boreali-Sinica*, 2017. № 32(1). P. 283–289.

320. Mao C., Feng Y., Wang X., Ren G. Review on research achievements of biogas from anaerobic digestion. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2015. 45. P. 540–555. DOI: 10.1016/j.rser.2015.02.032.

321. Mariem S. B., González-Torralba J., Collar C. et al. Durum Wheat Grain Yield and Quality under Low and High Nitrogen Conditions: Insights into Natural Variation in Low-and High-Yielding Genotypes. *Plants*. 2020. 9. 1636.

322. Marín-Martínez A., Sanz-Cobeña A., Bustamante M.A. et al. Effect of Organic Amendment Addition on Soil Properties, Greenhouse Gas Emissions and Grape Yield in Semi-Arid Vineyard Agroecosystems. *Agronomy*. 2021. 11(8). 1477. <https://doi.org/10.3390/agronomy11081477>.



323. Maron P.-A., Sarr A., Kaisermann A. et al. High microbial diversity promotes soil ecosystem functioning. *Applied and Environmental Microbiology*. 2018. 84(9). P. 02738–2817. DOI: 10.1128/AEM.02738-17.

324. Masse D. I., Talbot G., Gilbert Y. On farm biogas production: a method to reduce GHG emissions and develop more sustainable livestock operations. *Animal Feed Science and Technology*. 2011. 166–167. P. 436–445. DOI: 10.1016/j.anifeedsci.2011.04.075.

325. Meng Q. B., Zhang J. W., Ma W. C. et al. Effects of Biogas Slurry Fertilizer on Growth and Development Fruit Quality and Yield of Chili. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2020. № 48(23). P. 190–193.

326. Mengel K. Pflanzenernahrung, ihr Einfluss auf die Umwelt und ihre Bedeutung für die Produktion von Nahrungsmitteln und Rohstoffen. *Erged. Landwirtsch. Forsch. Justus-Lieb. Universität, Gießen*. 1979. № 15. S. 1–11.

327. Meyer A. K. P., Ehimen E. A., Holm-Nielsen J. B. Future European biogas: Animal manure, straw and grass potentials for a sustainable European biogas production. *Biomass and Bioenergy*. 2018. 111. P. 154–164. DOI: 10.1016/j.biombioe.2017.05.013.

328. Miceikienė A., Gesevičienė K., Rimkuvienė D. Assessment of the Dependence of GHG Emissions on the Support and Taxes in the EU Countries. *Sustainability*. 2021. V. 13 (14). DOI: <https://doi.org/10.3390/su13147650/>

329. Misi S. N., Forster C. F. Batchco-digestion of multi-component agro-wastes. *Bioresour. Technol.* 2001. 80(1). P. 19–28.

330. Mitura K., Cacak-Pietrzak G., Feledyn-Szewczyk B. et al. Yield and grain quality of common wheat (*Triticum aestivum* L.) depending on the different farming systems (organic vs. integrated vs. conventional). *Plants*. 2023. 12(5). 1022. <https://doi.org/10.3390/plants12051022>.

331. Möller K., Müller T. Effects of anaerobic digestion on digestate nutrient availability and crop growth: A review. *Engineering in Life Sciences*. 2012. 12. P. 242–257, DOI: 10.1002/elsc.201100085.

332. Nabel M. D., Schrey S., Poorter H. et al. Effects of digestate fertilization on *Sida hermaphrodita*: Boosting biomass yields on marginal soils by increasing soil

fertility. *Biomass and Bioenergy*. 2017. 107. P. 207–213. DOI: 10.1016/j.biombioe.2017.10.009.

333. Neri A., Bernardi B., Zimbalatti G., Benalia S. An overview of anaerobic digestion of agricultural by-products and food waste for biomethane production. *Energies*. 2023. 16(19). 6851. DOI: 10.3390/en16196851.

334. Nkoa R. Agricultural benefits and environmental risks of soil fertilization with anaerobic digestates : a review. 2014. P. 473–492. DOI:10.1007/s13593-013-0196-z.

335. Odlare M., Pell M., Svensson K. Changes in soil chemical and microbiological properties during 4 years of application of various organic residues. *Waste Management*. 2008. 28(7). P. 1246–1253, DOI: 10.1016/j.wasman.2007.06.005.

336. Okolie J. A., Epelle E. I., Tabat M. E. et al. Waste biomass valorization for the production of biofuels and value-added products: a comprehensive review of thermochemical, biological and integrated processes. *Process Saf. Environ. Protect*. 2022. 159. P. 323–344. [https://doi.org/ 10.1016/J.PSEP.2021.12.049](https://doi.org/10.1016/J.PSEP.2021.12.049).

337. Olesen J. R. E., Askegaard M., Rasmussen, I. A. Winter cereal yields as affected by animal manure and green manure in organic arable farming. *European Journal of Agronomy*. 2009. 30(2). P. 119–128.

338. Olsen D. J. R., Endelman J. B., Jacobson A. R., Reeve J. R. Compost carryover: nitrogen, phosphorus and FT-IR analysis of soil organic matter. *Nutrient cycling in Agro-ecosystems*. 2015. 101. P. 317–331. <https://doi.org/10.1007/s10705-015-9680-y>.

339. Pagés Díaz J., Pereda-Reyes I., Taherzadeh M. J. et al. Anaerobic co-digestion of solid slaughterhouse waster with agro-residues Synergistic and antagonistic interactions determined in batch digestion assays. *Chem. Eng. J*. 2014. 245. P. 89–98.

340. Pagés Díaz J., Westman J., Taherzadeh M.J. et al. Semi-continuous co-digestion of solid cattle slaughterhouse wastes with other waste streams: Interactions within the mixtures and methanogenic community structure. *Chem. Eng. J*. 2015. 273. P. 28–36.

341. Palamarchuk V. D., Krychkovskyi V. Yu. Efficiency of using digestate when growing carrot and red beet. *Feeds and Feed Production*. 2020. 90. P. 68–82. DOI: 10.31073/kormovyrobnytstvo202090-06.

342. Panchuk M. V., Shlapak L. S. Analysis of prospects for the development of production and use of biogas in Ukraine. *Exploration and Development of Oil and Gas Fields*. 2016. 3(60). P. 26–33.

343. Panuccio M. R., Papalia T., Attina E. et al. Use of digestate as an alternative to mineral fertilizer: effects on growth and crop quality. *Archives of Agronomy and Soil Science*. 2018. 65. P. 700–711.

344. Petraitytė D. The effect of liquid organic fertilisers on agroecosystems of different winter wheat varieties. Doctoral Dissertation Agricultural Sciences, Agronomy (A 001). Kaunas, 2024. 198 s.

345. Prudent M., Dequiedt S., Sorin C. et al. The diversity of soil microbial communities matters when legumes face drought. *Plant, Cell & Environment*. 2020. 43. P. 1023–1035. DOI: 10.1111/pce.13712.

346. Przygocka-Cyna K., Grzebisz W. Biogas digestate – benefits and risks for soil fertility and crop quality – an evaluation of grain maize response. *Open Chemistry*. 2018. 16(1). P. 258–271.

347. Putte A. Van den Govers G., Diels J. et al. Assessing the effect of soil tillage on crop growth: a meta-regression analysis on European crop yields under conservation agriculture. *Europ J. Agron*. 2010. V. 33. P. 231–241.

348. Rashwan A. K., Bai H., Osman A. I. et al. Recycling food and agriculture by-products to mitigate climate change: A review. *Environmental Chemistry Letters*. 2023. 21(6). P. 3351–3375. DOI: 10.1007/s10311-023-01639-6.

349. Regulation (EU) 2019/1009 of the European Parliament and of the Council of 5 June 2019 laying down rules on the making available on the market of EU fertilising products and amending Regulations (EC) No 1069/2009 and (EC) No 1107/2009 and repealing Regulation (EC) No 2003/2003. (OJ L 170, 25.6.2019). URL: <https://www.fao.org/faolex/results/details/en/c/LEX-FAOC187729/>

350. Ren H. S., Azeem M., Sun J. C. et al. Effect of different ratios of biogas slurry and chemical fertilizer on the yield and quality of tomato. *China Cucurbits and Vegetables*, 2020. № 33(09). P. 34–38.
351. Reuland, G., Sigurnjak, I., Dekker, H. et al. The Potential of Digestate and the Liquid Fraction of Digestate as Chemical Fertilizer Substitutes under the RENURE Criteria. *Agronomy*. 2021. 11(7). DOI: 10.3390/agronomy11071374.
352. Risberg K., Cederlund H., Pell M. et al. Comparative characterization of digestate versus pig slurry and cow manure – Chemical composition and effects on soil microbial activity. *Waste Manag.* 2017. 61. P. 529–538. DOI:10.1016/j.wasman.2016.12.016.
353. Rokhzadi A., Toashih V. Nutrient uptake and yield of chickpea (*Cicer arietinum* L.) inoculated with plant growth promoting rhizobacteria. *Australian Journal of Crop Science*. 2011. 5.44.
354. Rostami M., Koocheki A. R., Mahallati M. N., Kafi M. Evaluation of Chlorophyll Meter (SPAD) Data for Prediction of Nitrogen Status in Corn (*Zea mays* L.). *Am.-Eurasian J. Agric. Environ. Sci.* 2008. 3. P. 79–85.
355. Różyło K., Gawlik-Dziki U., Swieca M. et al. Winter wheat fertilized with biogas residue and mining waste - yielding and the quality of grain. *Journal of the Science of Food and Agriculture*. 2015. 96(10). P. 3454–3461.
356. Różyło K., Świeca M., Gawlik-dziki U. et al. Phytochemical properties and heavy metal accumulation in wheat grain after three years' fertilization with biogas digestate and mineral waste. 2017. P. 148–159.
357. Sakun L., Riznichenko L., Vielkin B. Prospects of biogas market development in Ukraine and abroad. *Economics and Management*. 2020. 37(1). P. 160–170. DOI: 10.31558/2307-2318.2020.1.16.
358. Sängler A., Geisseler D., Ludwig B. C and N dynamics of a range of biogas slurries as a function of application rate and soil texture: a laboratory experiment. *Archives of Agronomy and Soil Science*. 2014. 60. P. 1779–1794. <https://doi.org/10.1080/03650340.2014.907491>.

359. Sani M. N. H., Amin M., Bergstrand K. J. et al. Harnessing biostimulants from biogas digestates for high-value resource recovery: a review *Environ. Chem. Lett.* 2025. 23. P. 139–164. 10.1007/s10311-024-01801-8.
360. Scholz M. Creating a Circular Economy for Phosphorus Fertilizers. [https://ostara.com/wp-content/uploads/2017/09/Scholz\\_FF\\_Sept\\_Oct\\_2017.pdf](https://ostara.com/wp-content/uploads/2017/09/Scholz_FF_Sept_Oct_2017.pdf).
361. Schröder J., Uenk D., Hilhorst G.J. Long-term nitrogen fertilizer replacement value of cattle manures applied to cut grassland. *Plant Soil*. 2007. 299. P. 83–99.
362. Schroeder P., Anggraeni K., Weber U. The relevance of circular economy practices to the sustainable development goals. *J. Ind. Ecol.* 2019. №23. P. 77–95. <https://doi.org/10.1111/jiec.12732>.
363. Shao W. Q., Ji L., Sun C. M. et al. Effects of application rate of biogas slurry on growth, grain yield and heavy metals contents of rice. *Acta Agriculturae Zhejiangensis*. 2017. 12. P. 1963–1969.
364. Sharma S., Singh S., Singh M. et al. Changes in Wheat Rhizosphere Carbon Pools in Response to Nitrogen and Straw Incorporation. 2022. P. 1–21.
365. Šimon T., Kunzová E., Friedlová M. The effect of digestate, cattle slurry and mineral fertilization on the winter wheat yield and soil quality parameters. *Plant, Soil and Environment*. 2015. 61(11). P. 522–527, DOI: 10.17221/530/2015-PSE.
366. Skrzypczak D., Trzaska K., Gil F. et al. Biomass and Bioenergy Towards anaerobic digestate valorization to recover fertilizer nutrients: Elaboration of technology and profitability analysis. *Biomass and Bioenergy*. 2023. 178.106967. DOI:10.1016/j.biombioe.2023.106967.
367. Slepetiene A., Ceseviciene J., Amaleviciute-Volunge K. et al. Solid and liquid phases of anaerobic digestate for sustainable use of agricultural soil. *Sustainability*. 2023. 15(2). 1345.
368. Slepetiene A., Volungevicius J., Jurgutis L. et al. The potential of digestate as a biofertilizer in eroded soils of Lithuania. *Waste Management*. 2020. 102. P. 441–451. DOI: 10.1016/j.wasman.2019.11.008.

369. Soluk H. S., Butsiak V. I., Butsiak A. A. Biotechnology of biogas production from agricultural waste. Scientific Bulletin of S.Z. Gzhytsky Lviv National University of Veterinary Medicine and Biotechnology. 2015. 17 (63). P. 312–319.
370. Song Y. L., Yu J., Chen S. G. et al. Effects of Reduced Chemical Fertilizer with Application of Bio-organic Fertilizer on Rape Growth, Microorganism and Enzymes Activities in Soil. Journal of Soil and Water Conservation. 2018. № 32(01). P. 352–360.
371. Sun R., Dsouza M., Gilbert J. A. et al. Fungal community composition in soils subjected to long-term chemical fertilization is most influenced by the type of organic matter. Environ. Microbiol. 2016. 18. P. 5137–5150. <https://doi.org/10.1111/1462-2920.13512>.
372. Suter H. C., Pengthamkeerati P., Walker C. et al. Influence of temperature and soil type on inhibition of urea hydrolysis by N-(n-butyl) thiophosphoric triamide in wheat and pasture soils in south- eastern Australia. Soil Research. 2011. 49(4). P. 315–319.
373. Tabuchi M., Abiko T., Yamaya T. Assimilation of Ammonium Ions and Reutilization of Nitrogen in Rice (*Oryza sativa* L.). Journal of Experimental Botany. 2007. 58. P. 2319–2327. <https://doi.org/10.1093/jxb/erm016>.
374. Tang H., Guo Y. J., Li Z. Y. Effects of slurry application on ryegrass growth and soil properties. Acta Agrestia Sinica. 2011.(6. P. 939–942.
375. Tang W., Wu J., Sun B.Y. et al. Effects of Application Amounts of Biogas Slurry on Yield and Quality of Rice. Journal of Agro-Environment Science, 2010. № 29(12). P. 2268–2273.
376. Tanveer K. S., Lu X., Shah S.-U.-S. et al. Soil Carbon Sequestration through Agronomic Management Practices. In book: CO<sub>2</sub> Sequestration. Intech Open. 2020. DOI:10.5772/intechopen.87107.
377. Tewolde H., Sistani K. R., Rowe D. Broiler litter as a sole nutrient source for cotton: Nitrogen, phosphorus, potassium, calcium, and magnesium concentrations in plant parts. Journal of Plant Nutrition. 2005. 28. P. 605–619. <https://doi.org/10.1081/PLN-200052633>.

378. The International Code of Conduct for the Sustainable Use and Management of Fertilizers. FAO, 2019. Rome. 56 P. URL: <https://openknowledge.fao.org/items/16560e80-23b1-47e1-ba70-da5dc1c577fd>

379. Törnwall E., Pettersson H., Thorin E., Schwede S. Post-treatment of biogas digestate – An evaluation of ammonium recovery, energy use and sanitation. *Energy Procedia*. 2017. 142. P. 957–963. DOI: 10.1016/j.egypro.2017.12.153.

380. Torralbo F., Menéndez S., Barrena I., Estavillo J.M. Dimethyl pyrazol-based nitrification inhibitors effect on nitrifying and denitrifying bacteria to mitigate N<sub>2</sub>O emission. *Scientific reports*. 2017. 7(1). 13810. P. 1–11. DOI:10.1038/s41598-017-14225-y.

381. Tudor V. C., Stoicea P., Chiurciu I. A. et al. The use of fertilizers and pesticides in wheat production in the main European countries. *Sustainability*. 2023. 15. 3038. <https://doi.org/10.3390/su15043038>.

382. Udall D., Rayns F., Charlesworth S. The Potential of Biochar and Anaerobic Digestate use in a Temperate Conventional Wheat Production System. *Intern. Journal of Research in Agriculture and Forestry*. 2017. 4(10). P. 44–49.

383. Verdi L., Kuikman P. J., Orlandini S. et al. Does the use of digestate to replace mineral fertilizers have less emissions of N<sub>2</sub>O and NH<sub>3</sub>. *Agricultural and Forest Meteorology*. 2019. 269–270. P. 112–118. DOI: 10.1016/j.agrformet.2019.02.004.

384. Vindis P., Mursec B., Janzekovic M., Cus F. The impact of mesophilic and thermophilic anaerobic digestion on biogas production. *Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering*. 2009. 36(2). P. 192–198.

385. Vivant A. L., Garmyn D., Maron P. A. et al. Microbial diversity and structure are drivers of the biological barrier effect against *Listeria monocytogenes* in soil. *PLOS ONE*. 2013. 8. P. 1–11. DOI: 10.1371/journal.pone.0076991.

386. Vorobel M., Kaplinskyi V., Klym O. et al. Anaerobic fermentation of chicken manure and methods for intensifying methane output. *Scientific Horizons*. 2022. 25(4). P. 36–44. DOI: 10.48077/scihor.25(4).2022.36-44.

387. Wan H. W., Jia L. L., Zhao J. Q. et al. Effects of topdressing biogas slurry on photosynthesis characteristics of wheat and soil enzyme activities and nutrients.

Journal of Northwest A & F University (Natural Science Edition). 2017. № 45(01). P. 35–44.

388. Wang F. Q., Sun J. B., Zhao Y. K. et al. Effect of biogas fertilizer on wheat and rape yield, quality and soil improvement. *China Biogas*. 2015. 33(6). P. 98–101.

389. Wang F. Q., Sun J. B., Zhao Y. K. et al. Effect of biogas fertilizer on wheat and rape yield, quality and soil improvement. *China Biogas*. 2015. 33(6). P. 98–101.

390. Wang G. L., Kou X. M., Zhang J. H. et al. Effect of chemical fertilizer nitrogen substitution by biogas slurry on the growth and quality of rice. *Chinese Journal of Ecology*. 2018. № 37(09). P. 2672–2679.

391. Wang L., Bi J., Chen J. et al. Energy, environmental footprints and economic benefit of substituting inorganic fertilizer with organic manure for winter wheat in Huanghua Hai Plain. *European Journal of Agronomy*. 2025. V. 162. 127394. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2024.127394>.

392. Wang Q., Long B., Zhou Y., Luo L. Application effect of bio- organo-inorganic compound fertilizer on watermelon. *Phosphate and Compound Fertilizer*. 2009. 24(3). P. 79–80.

393. Wang Y. C., Cao S. H., Chu L. et al. Effects of different proportion of biogas slurry and nitrogen fertilizer application on dry matter accumulation of silage maize and soil fertility. *Acta Agriculturae Boreali-Occidentalis Sinica*. 2010. 9. P. 163–167.

394. Wang Y., Peng Y., Lin J. et al. Optimal nitrogen management to achieve high wheat grain yield, grain protein content, and water productivity: A meta-analysis. *Agricultural Water Management*. 2023. 290. 108587.

395. Wang Z., Zhou L. D., Liu S. R., Li H. The effect on abating pollution from farmland runoff by using biogas manures. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*. 2009. 10. P. 4604–4606.

396. Wang Z. S. Effects of biogas slurry planting ryegrass on soil environmental quality. *Journal of Agroenvironmental Sciences*. 2007. 26(1). P. 172–175.



397. Wei F., Li Yong Jie, Sun Q. W. et al. Effects of combined application of biogas slurry and chemical fertilizer on rice growth and soil quality. *Journal of Irrigation and Drainage*. 2023. 42(08). P. 48–54.
398. Weiland P. Production and energetic use of biogas from energy crops and wastes in Germany. *Applied Biochemistry and Biotechnology*. 2003. № 109 (1–3). P. 263–274.
399. Wieder W. R., Bonan G. B., Allison S. D. Global soil carbon projections are improved by modelling microbial processes. *Nat. Clim. Chang*. 2013. 3. P. 1–4. DOI:10.1038/nclimate1951.
400. Wu H. S., Guo D. J., Ma Y., Chang Z. Z. Effects of pig manure-biogas slurry application on soil ammonia volatilization and maize output and quality. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*. 2012. 20(2). P. 163–168.
401. Wu S. B., Cui C., Zhang X. Q. et al. Effects of application of biogas slurry on increasing yield and improving quality and on soil and water environment. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Machinery*. 2013. 44(08). P. 118–125.
402. Wu X. J., Tian J., Sun C. et al. Effects of Microbial Fertilizer on Yield and Quality of Apple in Old Orchards of Luochuan. *Shandong Agricultural Sciences*. 2018. № 50(07). P. 121–125.
403. Wysocka-Czubaszek A. Dynamics of nitrogen transformations in the soil fertilized with digestate from agricultural biogas plant. *J. Ecol. Eng*. 2019. 20. P. 108–117. DOI:10.12911/22998993/93795.
404. Wyzinska., M., Smreczak. B. The influence of type and rate of biochar on productivity of winter wheat. In *Proceedings of the 2019 International Conference «Engineering for Rural Development»*. (Jelgava, Latvia, 22–24 May 2019). Jelgava, 2019. P. 594–599.
405. Xiao G., Zhao Z., Liang L. et al. Improving nitrogen and water use efficiency in a wheat–maize rotation system in the North China Plain using optimized farming practices. *Agric. Water Manag.* 2019. V. 212. P. 172–180.

406. Xu W. H., Wang Z. Y., Wang Q. et al. A review on studies of biogas fermentation residue effect on vegetable yield and quality. *China Biogas*. 2005. 23. P. 27–29.

407. Yang Q., Zheng F., Jia X. et al. The combined application of organic and inorganic fertilizers increases soil organic matter and improves soil microenvironment in wheat-maize field. 2020. P. 2395–2404.

408. Yang Y. Q., Chen L. H., Zhou S. J. et al. Experimental Study on Bio-slurry and Chemical Fertilizer on Planting Cabbage. *Journal of Yunnan Normal University (Natural Sciences Edition)*. 2016. № 36 (03). P. 17–22.

409. Yun Z. G., Min T. G., Hua Z. X., Guang B. M. Research Progress on Resource Utilization of Biogas Residue and Biogas Slurry in China. *Journal of Shanxi Agricultural Sciences*, 2019. № 47(10). P. 1857–1860.

410. Zaharinov B. Biomass, biogas, compost energy of anthropogenic ecosystems. *Environmental biotechnology for the production of biogas and compost utilization*. Sofia : NBU, 2013.

411. Zang Y. F., Hao M. D., Zhang L. Q., Zhang H. Q. Effects of wheat cultivation and fertilization on soil microbial biomass carbon, soil microbial biomass nitrogen and soil basal respiration in 26 years. *Acta Ecologica Sinica*. 2015. № 35(05). P. 1445–1451.

412. Zelt T. New oil plants and their potential as feedstock for biokerosene production. *Biokerosene: Status and Prospects*. 2022. P. 277–301. [https://doi.org/10.1007/978-3-662-53065-8\\_13](https://doi.org/10.1007/978-3-662-53065-8_13)

413. Zhan Y. H., Yin F. B., Yue C. D. et al. Effect of pretreatment on hydraulic performance of the integrated membrane process for concentrating nutrient in biogas digestate from swine manure. *Membranes*. 2020. 10(10). DOI: 10.3390/membranes10100249.

414. Zhang F. M., Hu S. B., Kang K. et al. Effect of highly efficient biogas slurry fertilizer on greenhouse tomatoes. *Journal of Northwest A&F University (Natural Sciences Edition)*, 2013. № 41(06). P. 75–78.

415. Zhang P., Zhang H., Wu G. et al. Dose-Dependent Application of Straw-Derived Fulvic Acid on Yield and Quality of Tomato Plants Grown in a Greenhouse. 2021. 12. P. 1–12. DOI:10.3389/fpls.2021.736613.
416. Zhang X. J., Zhao Q., Ning X. G. Effects of Biogas Slurry Fertilizer Application on Growth, Yield and Quality of Potted Cucumber. Tianjin Agricultural Sciences, 2020. № 26(05). P. 5–8.
417. Zhang X., Zakharchenko E. A. Effect of biogas slurry returning to field on soil phosphatase activity. Interagency Thematic *Scientific Collection «Irrigated Agriculture»*. 2023. 79. P. 83–87. <https://doi.org/10.32848/0135-2369.2023.79.11>
418. Zhang Z., Tang H., Guo Y. J. Simulation study of nutrient leaching from soils irrigated with biogas slurry under different environmental temperatures. Acta Prataculturae Sinica. 2015. № 24(04). P. 57–65.
419. Zhang X. Effects of long-term biogas slurry application on soil properties and crop yield in the North China Plain: Manuscript Thesis for a Doctor Philosophy Degree (PhD): 201. Sumy, 2023. 151 p.
420. Zhang B. Y., Chen T. L., Wang B. Effects of long-term uses of chemical fertilizers on soil quality. Chinese agricultural science bulletin. 2010. 26(11). P. 182–187.
421. Zhang, L., Bao, C. Y., Zhang, M. K. Use biogas fertilizer to improve the soil fertility of newly reclaimed cultivated land. Chinese Journal of Soil Science. 2015. 46(6). P. 1472–1477.
422. Zhao H. J., Zou Q., Guo T. C. et al. Regulating Effects of Density and Top – dressing Time of Nitrogen on Characteristics of Radiation Transmission and Photosynthesis in Canopy of Massive-spike Winter Wheat Variety L906. Acta Agronomica Sinica. 2002. № 02. P. 270–277.
423. Zhao Z. C., Xin S. R., Zhang H. L. et al. Effect of Vegetable Waste Biogas Slurry on Yield and Quality of Substrate Cultivated Lettuce. China Biogas. 2020. № 38(03). P. 82–85.

424. Zhu Y. L., Na W., Xi D. B., Zhao X. Y. Effects of Application of Biogas Slurry of Pig Dung on Physical and Chemical Properties of Soil. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2012. № 40(31). P. 15202–15203.
425. Zirkler D., Peters A., Kaupenjohann M. Elemental composition of biogas residues: Variability and alteration during anaerobic digestion. *Biomass and Bioenergy*, 2014. № 67. P. 89–98. DOI: 10.1016/j.biombioe.2014.04.021
426. Żukowska G., Myszura M., Zdeb M., Pawłowska M. Carbon sequestration in soil as a sustainable way of greenhouse effect mitigation. *Problemy Ekorozwoju*. 2020. 15(2). P. 195–204.

## **ДОДАТКИ**

## Додаток А.1

### Акт впровадження

«ПОГОДЖЕНО»  
Проректор з наукової та  
інноваційної діяльності  
професор  
Віктор КАРПЕНКО  
« 16 » 09 2025 р.

«ЗАТВЕРДЖУЮ»  
В. о. ректора  
Владилена СОКИРСЬКА  
« 09 » 2025 р.

про впровадження /використання результатів дисертаційної роботи у  
навчальний процес і науково-дослідну роботу

Даним актом стверджується, що матеріали дисертаційної роботи **Шевчука Олександра Вікторовича** за темою «Агрохімічна ефективність супутніх продуктів виробництва біогазу на сірому лісовому ґрунті Правобережного Лісостепу України», представленої на здобуття освітньо-наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 201 «Агрономія», використовуються в навчальному процесі та науково-дослідній роботі кафедри агрохімії і ґрунтознавства факультету агрономії Уманського національного університету в процесі підготовки здобувачів спеціальності Н1 Агрономія.

Досліджені в дисертаційній роботі питання можливості використання рідкого дигестату у вигляді органічного добривального продукту для удобрення пшениці м'якої озимої і кукурудзи за різних доз внесення та поєднання з мінеральними добривами, його впливу на врожай і якість зерна та зараження його патогенами, закономірності зміни агрохімічного стану сірого лісового ґрунту, агрохімічна та економічна ефективності застосування дигестату та перспективи його використання для відновлення родючості ґрунтів впроваджені в навчальний процес викладання дисциплін «Агрохімія» та «Система застосування добрив».

Розглянуто та схвалено на засіданні кафедри агрохімії і ґрунтознавства факультету агрономії Уманського національного університету (протокол № 2 від 10 вересня 2025 року).

Декан факультету агрономії  
доктор с.-г. наук, професор

Сергій ПОЛТОРЕЦЬКИЙ

Завідувачка кафедри агрохімії і ґрунтознавства  
канд. с.-г. наук, доцент

Олена ЧЕРНО



## Додаток А.2

### Акт впровадження



«ПОГОДЖЕНО»

В. о. ректора Уманського національного  
університету

Владилена СОКИРСЬКА

«29» «09» 2025 р.

«ЗАТВЕРДЖУЮ»

Директор



В. ГАЙДУЧИК

«29» «09» 2025 р.

### АКТ

#### ВПРОВАДЖЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ НАУКОВО-ДОСЛІДНОЇ РОБОТИ

Цим актом стверджується, що результати наукової роботи за темою «Агрохімічна ефективність супутніх продуктів виробництва біогазу на сірому лісовому ґрунті Правобережного Лісостепу України», виконаної в Уманському національному університеті, впроваджено в технологічному процесі підприємства.

1. **Вид запровадження** – застосування удосконаленої системи удобрення пшениці озимої і кукурудзи на основі дигестату з курячого посліду.
2. **Характеристика масштабів впровадження** – розроблену систему удобрення пшениці озимої і кукурудзи впроваджено на площі відповідно 110 га та 145 га.
3. **Новизна результатів науково-дослідної роботи** – впроваджено науково-обґрунтовану систему удобрення пшениці озимої і кукурудзи, яка включає заміну синтетичних азотних добрив дозою рідкого дигестату відповідно 10 м<sup>3</sup>/га і 20 м<sup>3</sup>/га.
4. **Економічна ефективність** – 12,1 тис. грн/га – 15,2 тис. грн/га у цінах 2025 р.
5. **Соціальний і науково-технічний ефект** – запропонована система удобрення забезпечила стабільніший приріст урожаю зерна сільськогосподарських культур. Ресурсоощадне застосування удобрювальних продуктів з високим економічним ефектом, охорона довкілля від забруднення.

Аспірант кафедри  
агрохімії і ґрунтознавства  
Уманського національного  
університету



Олександр ШЕВЧУК

Додаток Б  
Список публікацій

**СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ**

*Статті у фахових виданнях України*

Шевчук О. В., Господаренко Г. М. Використання рідкого дигестату біогазового виробництва для підживлення пшениці озимої. *Зб. наук. пр. Уманського НУС*. 2023. Вип. 103. Ч. 1. С. 18–26. DOI: 10.32782/2415-8240-2023-103-1-18-26.

Шевчук О. В., Господаренко Г. М. Основні характеристики біогазового дигестату з курячого посліду. *Зб. наук. пр. Уманського НУС*. 2024. Вип. 104. Ч. 1. С. 19–32. DOI: 10.32782/2415-8240-2024-104-1-19-32.

Шевчук О. В., Господаренко Г. М. Порівняльна характеристика дигестату з іншими органічними добривами. *Вісник Уманського НУС*. 2025. №1. С. 42–48. DOI <https://doi.org/10.32782/2310-0478-2025-1-42-48>

Шевчук О. В., Господаренко Г. М. Ефективність підживлення пшениці озимої дигестатом. *Таврійський науковий вісник*. 2025. Вип. 142. Ч. 2. С. 160–168. DOI <https://doi.org/10.32782/2226-0099.2025.142.2.20>

Шевчук О. В., Господаренко Г. М. Ефективність дигестату в системі удобрення кукурудзи. *Зб. наук. пр. Уманського НУС*. 2025. Вип. 106. Ч. 1. С. 189–197. DOI: 10.32782/2415-8240-2025-106-1-189-197

*Матеріали науково-практичних конференцій*

Господаренко Г. М., Шевчук О. В. Перспективи використання на удобрення біогазової суспензії. Матеріали Всеукраїнської науково-практичної конференції «Актуальні питання агротехнологій» (м. Умань, 27 жовтня 2022 р.). Умань : УНУС, 2022. С. 15–18.

Господаренко Г. М., Шевчук О. В. Ефективність підживлення пшениці озимої рідким дигестатом. *Матеріали Міжнар. наук.-практ. конф. «Інновації у сучасному агропромисловому виробництві»* (Одеса, 21–22 вересня 2023 р.). Одеса, 2023. С. 251–255.



Шевчук О. В., Господаренко Г.М. Основні характеристики супутніх продуктів виробництва біогазу з курячого посліду. *Матеріали Міжнар. н.-п. конф. з нагоди 100-річчя від дня народження д. с.-г. н., проф., академіка Ф. Т. Моргуна, 90-річчя Агрономічного факультету ДДАЕУ та Міжнародного дня здоров'я рослин* (Дніпро, 16–17 травня 2024 року). Дніпро: ДДАЕУ, 2024. С. 82–84.

Шевчук О. В., Господаренко Г. М. Вплив дигестату на якість зерна пшениці та збір білка. Інноваційні технології у рослинництві: матеріали міжнародної науково-практичної інтернет-конференції до 115-ої річниці з дня народження доктора сільськогосподарських наук, професора, член-кореспондента НАН України, Заслуженого діяча науки України Кияка Григорія Степановича (Львів-Дубляни, 30 квітня 2025 р.). [Електронний ресурс]. Львів-Дубляни: Львівський НУВМБ ім. С. З. Гжицького. Північний кампус, 2025. С. 159–162. <https://repository.lnup.edu.ua/jspui/handle/123456789/2477>

Шевчук О. В., Господаренко Г. М. Ефективність удобрення пшениці озимої і кукурудзи дигестатом. *Зб. пр. учасників Міжнар. наук.-практ. конф. «Інноваційні технології в рослинництві та землеробстві»*. (Житомир, 3–4 квітні 2025 р.). Житомир, 2025. С. 90–96.

Господаренко Г. М., Шевчук О. В. Вплив дигестату на формування продуктивності кукурудзи. *Зб. пр. учасників Міжнар. наук.-практ. конф. «Інноваційні технології в рослинництві та землеробстві»*. (Житомир, 3–4 квітні 2025 р.). Житомир, 2025. С. 297–305.

Шевчук О. В., Господаренко Г. М. Перспективи використання супутніх продуктів виробництва біогазу в сучасних агротехнологіях. *Тези Міжнар. наук.-практ. конф., яка присвячена 100-річчю проф. М. К. Шикули «Ґрунтозахисні технології як фактор родючості ґрунтів і високих врожайів»*. (Київ, 20–21 лютого 2025 р.). Київ, 2025. С. 86–88.

Шевчук О. В., Господаренко Г. М. Ефективність дигестату в системі удобрення кукурудзи. *Зб. наук. пр. Уманського НУС*. 2025. Вип. 106. Ч. 1. С. 189–197. DOI: 10.32782/2415-8240-2025-106-1-189-197

Шевчук О. Баланс основних елементів живлення в ґрунті під пшеницею озимою за різних доз внесення дигестату. *Тези Всеукр. наук.-практ. інтернет-конференції «Рубіновські читання», приуроченій 125-річчю від дня народження видатного вченого, професора Симона Самійловича Рубіна.* (Умань, 16 травня 2025 р.). Умань, 2025. С. 16–17.

Господаренко Г., Шевчук О. Енергетична ефективність застосування дигестату під пшеницю озиму та кукурудзу. *Збірник тез міжнародної інтернет-конференції «Наукове забезпечення виробництва конкурентоспроможної сільськогосподарської продукції в умовах формування екологічностійких агроландшафтів».* (Умань, 17 червня 2025 р.). Умань, 2025. С. 52–54.

Шевчук О. В., Господаренко Г. М. Ефективності застосування дигестату для удобрення польових культур. *Збірник тез Міжнародної науково-практичної конференції «Адаптація агровиробництва до змін клімату та ґрунтової родючості»* (с-ще Полігон, Миколаївської обл., 9 жовтня 2025 р.). ДУ «Миколаївська державна с.-г. дослідна станція ІКОСГ НААН», 2025. С. 90–92.

# Додаток В.1

## Кількість опадів (мм) у період проведення досліджень

(за даними метеостанції Умань)

С.-г. рік	Місяць												Середня за рік
	IX	X	XI	XII	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	
	Середньобогаторічне значення												
	61	43	43	40	38	34	36	41	52	81	68	49	
2020–2021	27,4	81,5	19,4	32,6	59,7	43,2	32,4	49,9	56,4	104,7	89,8	69,9	666,9
	-33,6	38,5	-23,6	-7,4	21,7	9,2	-3,6	8,9	4,4	23,7	21,8	20,9	80,9
2021–2022	16,2	7,0	21,2	91,2	23,9	7,2	13,4	57,7	22,4	36,3	28,1	44,4	369,0
	-44,8	-36,0	-21,8	51,2	-16,3	-25,7	-22,6	16,7	-29,6	-44,7	-39,9	-4,6	-217,0
2022–2023	99,2	10,0	71,8	53,1	6,0	20,5	27,2	129,6	42,4	15,8	92,5	15,4	583,5
	38,2	-33,0	-41,2	11,2	-32,0	-13,5	-8,8	88,6	-9,6	-65,2	24,4	33,6	-2,5
2023–2024	4,2	33,5	62,3	55,0	29,8	14,9	89,5	56,2	41,8	56,5	17,9	17,7	479,3
	-56,8	-9,5	19,3	15,0	-8,2	-19,1	53,5	15,2	-10,2	-24,5	-50,1	-31,3	-106,7

*Примітка.* Під рискою – відхилення показника від кліматичної норми, ±

## Додаток В.2

### Температура повітря (°C) у період проведення досліджень (за даними метеостанції Умань)

С.-г. рік	Місяць												Серед ня з рік
	IX	X	XI	XII	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	
	Середньобагаторічне значення												8,8
	14,5	8,3	2,8	-1,8	-3,4	-2,3	2,5	9,7	15,4	19,0	20,9	20,1	
2020–2021	21,2	17,8	12,7	3,7	2,3	3,8	2,0	7,4	14,0	19,8	23,2	20,3	11,3
	6,7	9,5	9,9	5,5	5,7	6,1	-0,5	-2,3	-1,4	0,8	2,3	0,2	2,5
2021–2022	13,0	7,2	4,7	-1,0	-1,3	1,8	2,0	8,6	14,5	20,5	21,0	21,7	9,4
	-1,5	-1,1	1,9	0,8	2,1	4,1	-0,5	-1,1	-0,9	1,5	0,1	1,6	0,6
2022–2023	13,1	10,0	3,7	-0,4	0,2	-0,2	5,1	8,8	15,4	19,6	21,3	22,8	9,9
	-1,4	1,7	0,9	1,4	3,6	2,1	2,6	-0,9	0	0,6	0,4	2,7	1,1
2023–2024	18,4	11,7	4,6	1,2	-1,6	4,2	4,5	13,0	15,3	21,2	24,3	23,1	11,7
	3,9	3,4	1,8	4,0	1,8	6,5	2,0	3,3	-0,1	2,2	3,4	3,0	2,9

*Примітка.* Під рискою – відхилення показника від кліматичної норми, ±

### Додаток В.3

#### Відносна вологість повітря (%) у період проведення досліджень (за даними метеостанції Умань)

С.-г. рік	Місяць												Сере дня за рік
	IX	X	XI	XII	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	
	Середньобогаторічне значення												
	73	80	87	88	86	85	82	68	64	66	67	68	76
2020–	62	83	88	93	89	83	77	71	73	73	71	71	78
2021	-11	3	1	5	3	-2	-5	3	9	7	4	3	2
2021–	74	70	85	88	80	76	67	68	59	64	63	71	72
2022	1	-10	1	5	-6	-2	-15	0	-5	-2	-4	3	-4
2022–	79	78	89	89	89	81	72	80	56	64	68	68	69
2023	6	-2	2	1	3	-4	-10	12	-8	-2	1	0	-7
2023–	62	73	82	86	84	80	76	67	57	69	60	56	61
2024	-11	-7	-5	-2	-2	-5	-6	-1	-7	3	-7	-12	-15

*Примітка.* Під ризикою – відхилення показника від кліматичної норми,  $\pm$