

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ДНІПРОВСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ АГРАРНО-ЕКОНОМІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет водогосподарської інженерії та екології
Кафедра екології

ДОПУСКАЄТЬСЯ ДО ЗАХИСТУ

Зав. кафедрою екології

доц. _____ Вікторія КАЦЕВИЧ

« _____ » грудня 2025р.

Пояснювальна записка

до кваліфікаційної роботи освітнього ступеня «магістр»
на тему: «Біоконверсія місцевих органічних відходів
у агровиробництві Черкаської області»

Виконав: здобувач вищої освіти 2 курсу, групи

МгЕ-1-24 спеціальності

101 «Екологія»

_____ Засуха М.А.

Керівник _____ доц., к.с.-г.н Зленко І.Б

Дніпро 2025

ДНІПРОВСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ АГРАРНО-ЕКОНОМІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет: Водогосподарської інженерії та екології

Кафедра: Екології

Освітньо-професійна програма: «Екологія»

Спеціальність: 101 «Екологія»

Ступінь вищої освіти: Магістр

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Зав. кафедрою екології

_____ Вікторія КАЦЕВИЧ

«_____» _____ 2025 р.

З А В Д А Н Н Я

на підготовку кваліфікаційної роботи

Засуха Максим Анатолійович

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи: Біоконверсія місцевих органічних відходів у агровиробництві Черкаської області

керівник роботи: к.с.-г.н, доц., Зленко Ірина Борисівна

(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджена наказом по ДДАЕУ від «15» жовтня 2025 р. №3074.

2. Термін здачі здобувачем вищої освіти закінченого проекту (роботи):

«16» грудня 2025 р.

3. Вихідні дані до роботи: звіти, дані власних експериментів та спостережень

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, що їх належить розробити):

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень):

6 рисунків та 15 таблиць та 67 посилань, Сторінок – 89.

Дата видачі завдання: «3» вересня 2025 р.

Керівник проекту (роботи): _____ / Зленко І.Б.

Завдання прийняв до виконання: _____ / Засуха М.А.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ пп	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1	Огляд літератури за темою дослідження	03.09.2025-18.09.2025	виконано
2	Фізико-географічна і кліматична характеристика об'єкта досліджень	18.09.2025-03.10.2025	виконано
3	Методи досліджень	04.10.2025-17.10.2025	виконано
4	Результати досліджень та їх аналіз	18.10.2025-29.10.2025	виконано
5	Охорона праці	14.11.2025-27.11.2025	виконано
6	Оформлення дипломної роботи	28.11.2025-08.12.2025	виконано

Здобувач _____ / (Засуха М.А.) /
(підпис)

Керівник проекту (роботи) _____ / (Зленко І.Б.) /
(підпис)

РЕФЕРАТ

Дипломна робота «Біоконверсія місцевих органічних відходів у агровиробництві Черкаської області». Робота складається зі вступу, чотирьох розділів і висновків. Повний обсяг роботи – 89 сторінок друкованого тексту, включаючи 6 рисунків та 15 таблиць. Перелік посилань містить 67 найменувань.

Мета дослідження – оцінити можливості біоконверсії пташиного пера та інших органічних відходів як джерела біодобрих для агровиробництва Черкаської області.

Об’єкт дослідження – органічні відходи птахівництва та ґрунти агроєкосистем регіону.

Предмет дослідження – процеси біоконверсії та вплив продуктів розкладання кератину на ґрунт і рослини.

Для досягнення мети були визначені такі завдання:

- проаналізувати особливості утилізації місцевих органічних відходів;
- дослідити активність кератинолітичних мікроорганізмів;
- оцінити властивості продуктів біоконверсії;
- визначити їхній вплив на ґрунтові показники та рослини.

Методи: мікробіологічні, фізико-хімічні, агрохімічні та статистичні.

Біоконверсія пташиного пера з участю кератинолітичних бактерій утворює поживні сполуки, покращує властивості ґрунту, підвищує врожайність культур і здійснює екологічно безпечну переробку органічних відходів.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: БІОКОНВЕРСІЯ, КЕРАТИНОЛІТИЧНІ МІКРООРГАНІЗМИ, ОРГАНІЧНІ ВІДХОДИ, ПТАШИНЕ ПЕРО, МІКРОБІОЛОГІЧНА АКТИВНІСТЬ, ҐРУНТ.

ЗМІСТ

ВСТУП	6
1 НАУКОВІ ОСНОВИ БІОКОНВЕРСІЇ ОРГАНІЧНИХ ВІДХОДІВ В АГРОВИРОБНИЦТВІ.	8
1.1 Сучасний стан проблеми утилізації відходів птахівництва.	8
1.2. Органічні відходи птахівництва	10
1.3. Деградація пташиного пір'я в природних умовах.	13
1.4. Хімічний склад і біологічна цінність пташиного пір'я.	16
1.5 Джерело фосфору для агроєкосистем.	18
1.6. Фосфор у системі мінерального живлення рослин.	21
1.7. Екологічні аспекти переробки органічних відходів птахівництва.	24
1.8 Біоконверсія органічних відходів.	27
1.9 Світовий досвід використання продуктів біоконверсії.	30
2 МАТЕРІАЛИ ТА МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕНЬ.	34
2.1. Місце акумулювання органічних відходів	34
2.2. Джерела та особливості утворення органічних відходів	36
2.3. Ґрунтово-кліматичні умови Черкаської області.	38
2.4. Методика проведення досліджень	40
3 РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ ТА ЇХ ОБГОВОРЕННЯ.	43
3.1 Біометричні показники культур за дії органічного добрива.	43
3.2 Вплив біопрепарату на врожайність культур.	55
3.3 Якісні параметри отриманої продукції	59
3.4 Агрохімічні зміни у ґрунті.	64
4 ОХОРОНА ПРАЦІ.	72
4.1 Загальні вимоги охорони праці	72
4.2 Безпека при використанні обладнання та технічних засобів.	74
4.3 Заходи з профілактики впливу шкідливих факторів.	76
4.4 Безпека при агротехнічних роботах.	78
ВИСНОВКИ.	81
СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ.	83

ВСТУП

Тема біоконверсії місцевих органічних відходів набирає підвищеної значущості в умовах сучасного агровиробництва, яке потребує переходу до сталих, екологічно безпечних та ресурсоефективних технологій. Утворення значних обсягів органічних відходів є характерною рисою аграрного виробництва, а питання їх утилізації без шкоди для довкілля є одним із ключових викликів сьогодення. Особливо це стосується тих відходів, що характеризуються складною структурою та низькою здатністю до природного розкладання. До таких матеріалів належить пташине пір'я — побічний продукт роботи птахівничих підприємств, який накопичується у великих кількостях та потребує ефективних методів переробки.

Біоконверсія як технологія перетворення органічних відходів за участю мікроорганізмів є перспективним напрямом вирішення цієї проблеми. На відміну від звичних методів переробки, вона базується на природних біохімічних процесах та дозволяє перетворювати складні органічні сполуки в доступні для засвоєння рослинами форми, не створюючи вторинних забруднень. Пташине пір'я містить у своєму складі кератин, амінокислоти, органічний азот, сірку та фосфор, однак ці компоненти залишаються недоступними в умовах природної деградації. Технологія біоконверсії дає змогу залучити цей потенціал до біологічного кругобігу та отримати високоякісний органічний продукт із вираженим удобрювальним ефектом.

Однією з причин вибору саме Черкаської області як регіону дослідження є її роль як одного з ключових центрів птахівництва України. Наявність великої кількості птахофабрик формує суттєві викиди місцевих органічних відходів, зокрема пір'я, що створює екологічні та технологічні виклики. У таких умовах впровадження біоконверсійних технологій стає особливо актуальним, бо

забезпечує не лише вирішити проблему утилізації складнорозкладних матеріалів, а й отримати додатковий ресурс для підвищення ефективності агровиробництва в регіоні. Крім того, ґрунтово-кліматичні умови Черкащини сприятливі для вирощування овочевих культур та застосування органічних добрив, що робить регіон оптимальним майданчиком для проведення досліджень і впровадження результатів на практиці.

Актуальність теми дипломної роботи полягає у необхідності поєднання екологічних рішень із підвищенням продуктивності агросистем, раціональному використанні місцевих ресурсів та мінімізації впливу агровиробництва на навколишнє середовище. Вивчення ефективності біоконверсії пташиного пір'я та її впливу на ґрунтові процеси та розвиток овочевих культур дає змогу розробити науково обґрунтовані методики створення ресурсозберігаючих та екологічно збалансованих технологій у аграрному секторі Черкаської області. Результати роботи можуть бути використані для оптимізації місцевих агротехнологій, підвищення родючості ґрунтів та впровадження інноваційних біотехнологічних рішень у регіональне виробництво.

1 НАУКОВІ ОСНОВИ БІОКОНВЕРСІЇ ОРГАНІЧНИХ ВІДХОДІВ В АГРОВИРОБНИЦТВІ

1.1 Сучасний стан проблеми утилізації відходів птахівництва

Сучасний розвиток агропромислового комплексу характеризується інтенсифікацією виробництва та зростанням обсягів органічних відходів, що формує одну з найвагоміших екологічних проблем сьогодення. За даними міжнародних досліджень, у світі щорічно утворюється понад 2 млрд тонн твердих побутових відходів, з яких значну частку становлять саме органічні відходи аграрного походження. Передбачається, що до 2050 року цей показник зросте до 3,4 млрд тонн, при цьому майже третина всіх відходів утилізується без дотримання екологічних стандартів, що призводить до масштабного забруднення довкілля та посилення кліматичних змін [1].

Особливе місце у структурі органічних відходів займають відходи птахівництва, зокрема пташиний послід і пір'я. Галузь птахівництва є однією з найбільш динамічних у світовому тваринництві, оскільки гарантує населенню доступне джерело білка при відносно низьких витратах на виробництво. Разом із тим інтенсивне утримання птиці супроводжується формуванням значних обсягів відходів, які за відсутності раціональної системи утилізації стають джерелом серйозного екологічного навантаження на агроландшафти [2].

За оцінками науковців, щорічні обсяги втрат органічних відходів агропродовольчого походження у світі перевищують 1,3 млрд тонн, що супроводжується економічними збитками понад 750 млрд доларів США на рік. Ці втрати водночас означають не лише марнування поживних ресурсів, а й

значний шкідливий вплив на якість атмосферного повітря, стан ґрунтів та водних об'єктів через утворення продуктів анаеробного розкладу органічної речовини

Під час традиційного зберігання та захоронення відходів птахівництва відбувається інтенсивне виділення парникових газів, насамперед метану (CH_4) та вуглекислого газу (CO_2). Метан у десятки разів перевищує вуглекислий газ за здатністю утримувати тепло в атмосфері, що робить аграрні відходи важливим чинником глобальних кліматичних змін. Крім того, у процесі мікробіологічного розкладу пташиного посліду виділяються аміак, сірководень, оксиди азоту та леткі органічні сполуки, які спричиняють погіршення якості повітря та утворення територій з підвищеним екологічним ризиком [3].

Традиційні методи утилізації відходів птахівництва, зокрема компостування, складування та внесення у ґрунт у сирому вигляді, не завжди забезпечують екологічну безпеку. Компостування, яке тривалий час вважалося основним способом переробки органічних відходів, супроводжується істотними втратами азоту та вуглецю у вигляді газоподібних продуктів, що знижує агрономічну цінність компосту та підвищує рівень викидів парникових газів. Окрім цього, неконтрольоване внесення посліду може призводити до надмірного накопичення нітратів у ґрунті, вторинного засолення та забруднення ґрунтових вод.

У сучасній світовій науковій практиці дедалі більшої уваги надається переходу від лінійної моделі поводження з відходами до циркулярної біоекономіки, що передбачає повторне залучення відходів у виробничий цикл із максимальним збереженням ресурсів. У цьому контексті відходи птахівництва розглядаються не як небезпечний баласт, а як перспективне джерело органічної речовини, біогенних елементів та енергії. Доведено, що застосування технологій біологічної переробки дозволяє перетворювати органічні відходи у добрива, біогаз, біологічно активні препарати та амінокислотні комплекси, що суттєво підвищує ефективність агровиробництва.

Актуальність проблеми утилізації відходів птахівництва посилюється також регіональними особливостями аграрного виробництва. Для України,

зокрема для аграрно розвинених регіонів, до яких належить і Черкаська область, характерні високі концентрації птахофабрик, що формують значні локальні обсяги органічних відходів. За відсутності сучасних біотехнологій їх переробки зростає ризик деградації ґрунтового покриву, забруднення водних ресурсів та порушення санітарно-екологічного балансу територій.

На сучасному етапі утилізація відходів птахівництва є важливою науково-практичною проблемою, що потребує впровадження інноваційних підходів, орієнтованих на біоконверсію органічної сировини. Перехід до екологічно безпечних технологій переробки дозволяє одночасно зменшити негативний вплив на довкілля, забезпечити агровиробництво доступними органічними добривами та сформуванати основу для сталого розвитку сільських територій [4].

1.2. Органічні відходи птахівництва

До основних видів органічних відходів птахівництва належать пташиний послід, пір'я, залишки кормів, підстилкові матеріали, а також органічні рештки, які утворюються під час забою та первинної переробки птиці. Вказані відходи характеризуються високим вмістом органічної речовини, макро- і мікроелементів, а також біологічно активних сполук, що зумовлює їх значний потенціал як вторинної сировини для аграрного виробництва та біотехнологічної переробки [5].

Пташиний послід є традиційним джерелом органічного азоту, фосфору, калію та органічної речовини, проте його безконтрольне використання пов'язане з низкою екологічних ризиків, зокрема з вторинним забрудненням ґрунтів і водних ресурсів, накопиченням нітратів, підвищенням емісії аміаку та парникових газів. У зв'язку з цим наукові дослідження дедалі частіше спрямовуються на пошук альтернативних шляхів переробки пташиного посліду

з отриманням стабілізованих, екологічно безпечних і агрономічно цінних продуктів.

Особливу увагу в сучасних дослідженнях приділяють пташиному пір'ю як специфічному виду органічних відходів птахівництва. Пір'я становить до 5–7 % від загальної маси тіла птиці та щорічно утворюється у значних обсягах на птахофабриках. Основу пір'я становить кератин — складний фібрилярний білок, який характеризується високою механічною міцністю, гідрофобністю та стійкістю до дії більшості фізико-хімічних і біологічних чинників. Саме ці властивості обумовлюють тривалий період природної деградації пір'я у ґрунті та створюють серйозні труднощі для його утилізації традиційними методами.

Водночас кератин пташиного пір'я є цінним джерелом органічного азоту, вуглецю, сірки та амінокислот, зокрема цистеїну, цистину, глютамінової та аспарагінової кислот, що відкриває можливості його використання як сировини для отримання біологічно активних продуктів. У зв'язку з цим у світі активно розвиваються біотехнологічні методи переробки пташиного пір'я, які базуються на використанні мікроорганізмів і їхніх ферментних систем [6].

Особливу роль у біоконверсії органічних відходів птахівництва відіграють мікробні ферменти, насамперед кератинази, протеази, амілази та ліпази. Ці ферменти забезпечують розщеплення складних органічних сполук до простіших форм, що можуть бути засвоєні рослинами або використані для створення біопрепаратів. Біотехнологічна ферментативна переробка пір'я дозволяє отримувати гідролізати, збагачені амінокислотами, пептидами та доступними формами азоту, які використовуються як органічні добрива, біостимулятори росту та компоненти функціональних агропрепаратів.

Одним із перспективних мікроорганізмів, що застосовуються для біоконверсії пташиного пір'я, є *Bacillus aerius*, який виявляє високу кератинолітичну активність. Дослідження показують, що цей штам здатний ефективно руйнувати кератинову структуру пір'я, забезпечуючи глибоку біотрансформацію органічної речовини з утворенням фізіологічно активних продуктів. Використання такого підходу розглядається як перспективний

інструмент комплексного управління відходами птахівництва, що поєднує екологічну безпеку, ресурсозбереження та можливість отримання продукції з високою доданою вартістю [7].

Сучасна наукова парадигма переробки органічних відходів дедалі більше орієнтована на реалізацію концепції «від ферми до функціональності», яка передбачає трансформацію агровідходів у корисні функціональні продукти. У межах цієї концепції пташине пір'я використовується не лише для виробництва органічних і органо-мінеральних добрив, а й як сировина для створення біополімерів, біокомпозитів, кормових добавок, сорбентів, а також біологічно активних препаратів для рослинництва. Такий підхід дозволяє значно підвищити економічну ефективність утилізації відходів і зменшити негативний вплив птахівництва на довкілля.

Поряд із мікробною біоконверсією важливим напрямом залишається компостування органічних відходів птахівництва з використанням пір'я як структуроутворювального та поживного компонента. Дослідження мікробної та фізико-хімічної динаміки компостів на основі курячого пера свідчать, що в процесі дозрівання компосту змінюються показники рН, електропровідності, співвідношення вуглецю до азоту, а також відбувається активне формування мікробіоценозів, які забезпечують інтенсивну мінералізацію органічної речовини. Внесення таких компостів у ґрунт позитивно впливає на його агрофізичні властивості, мікробіологічну активність та поживний режим.

Експериментальні дослідження підтверджують, що компости з додаванням курячого пір'я здійснюють позитивний стимулюючий ефект на розвиток і вегетацію культур, зокрема томатів. Спостерігається підвищення енергії проростання насіння, інтенсифікація ростових процесів, нарощування вегетативної маси та збільшення врожайності, що зумовлено поступовим надходженням у ґрунт доступних форм азоту, фосфору, калію та біологічно активних речовин. [8].

Використання органічних відходів птахівництва як вторинної сировини має комплексне екологічне, економічне та агрономічне значення. Біоконверсія

сприяє скороченню обсягів захоронення відходів, зниженню рівня забруднення атмосферного повітря, ґрунтів і вод, зменшенню емісії парникових газів, а також формуванню стабільних замкнених циклів обігу поживних речовин у агроєкосистемах.

Органічні відходи птахівництва на сучасному етапі розглядаються не як екологічна загроза, а як стратегічний ресурс для розвитку біотехнологій, стійкого агровиробництва та циркулярної економіки. Особливо перспективним є залучення пташиного пір'я до процесів мікробної біоконверсії з метою отримання продуктів із високою доданою вартістю, що створює наукове підґрунтя для подальших прикладних досліджень і впровадження цих технологій у практику аграрного виробництва України, зокрема в умовах Черкаської області.

1.3. Деградація пташиного пір'я в природних умовах

Пташине пір'я належить до найбільш стійких до природного розкладання органічних відходів птахівництва, що зумовлено його унікальною структурою та хімічним складом. Основним структурним компонентом пір'я є кератин — фібрилярний білок з надзвичайно високим ступенем упорядкованості, насичений дисульфідними зв'язками та гідрофобними амінокислотами. Сітка міжланцюгових і внутрішньоланцюгових дисульфідних містків формує просторово стабільну, високоміцну структуру, яка забезпечує стійкість кератину до механічного стирання, ферментативного руйнування і впливу більшості мікроорганізмів. Завдяки цим властивостям пір'я зберігає цілісність у природних умовах надзвичайно тривалий час, а процеси його мінералізації відбуваються повільно, що спричиняє нагромадження цього виду відходів у ґрунтовому середовищі та на полігонах [9].

Природна деградація пір'я є багатоетапним і багатofакторним процесом, який визначається взаємодією абіотичних і біотичних чинників. Важливу роль відіграють температура, вологість, ступінь аерації, кислотно-лужний баланс ґрунтів, гранулометричний склад, а також структурна організація й функціональна активність ґрунтових мікробних ценозів. У помірних кліматичних зонах без залучення кератинолітичних мікроорганізмів повний природний розклад пір'я може тривати від кількох років до десятиліть. Це пояснюється тим, що присутні в ґрунті мікроорганізми, здатні до кератинолізу, трапляються рідко і зазвичай не формують колоній з достатньо високою ферментативною активністю. У ґрунтах із низьким вмістом органічної речовини, у деградованих або ущільнених профілях швидкість розкладання ще більше зменшується, оскільки обмежується доступ кисню, води та субстратів, необхідних для підтримання мікробної біоактивності.

Зональні ґрунтово-кліматичні умови визначають динаміку мінералізації пір'я особливо виразно. У вологих і теплих регіонах, де спостерігається підвищена активність мікроорганізмів, процеси деструкції прискорюються, хоча й залишаються відносно повільними через внутрішню стабільність кератину. У посушливих зонах з дефіцитом доступної вологи гальмуються як гідролітичні реакції, так і ріст мікробних популяцій, що практично блокує кератиноліз. У холодних регіонах із тривалим періодом низьких температур активність мікроорганізмів різко знижується, і мінералізація пір'я може практично припинитися на місяці [10].

У структурованих, добре аерованих ґрунтах із високим рівнем органічної речовини та активним мікробним комплексом деградація пір'я відбувається дещо швидше. Проте навіть у найсприятливіших умовах природна біодеструкція кератину залишається низькоінтенсивною через обмежений набір природних мікроорганізмів, здатних використовувати кератин як єдине джерело вуглецю, азоту та енергії. До таких організмів належать певні види бактерій (*Bacillus*, *Streptomyces*, *Pseudomonas*), а також окремі групи грибів (*Chrysosporium*, *Trichophyton*, *Microsporum*, *Myceliophthora*). Відомо, що природна чисельність

цих видів у ґрунті є незначною, а їх ферментативна активність недостатня для швидкого розкладання значної кількості пір'яних мас. Тому навіть у агроєкосистемах з високою біологічною активністю ізольовані елементи пір'я можуть зберігатися практично незмінними протягом тривалих періодів.

Абіотичні чинники деструкції, такі як ультрафіолетове випромінювання, температурні коливання, механічний вплив опадів та вітру, лише частково сприяють руйнуванню поверхневих шарів пір'я. Проте внутрішня фібрилярна структура залишається недоторканою через відсутність процесів глибокого сульфїтолізу й протеолізу, що характерні для спеціалізованих кератинолітичних мікроорганізмів. Відтак природні абіотичні чинники не здатні забезпечити повноцінну й ефективну деградацію цього виду органічних відходів [11].

Акумуляція пір'я у ґрунтовому середовищі призводить до формування ряду екологічно небажаних наслідків. Через низьку проникність та вологоємність частки пір'я можуть порушувати водний і повітряний баланс ґрунтів, знижувати активність ґрунтової біоти та несприятливо впливати на проростання насіння. У місцях тривалого накопичення пір'я можливий розвиток умовно-патогенних мікроорганізмів, що становлять загрозу фітосанітарному стану агроєкосистем. Крім того, поживні елементи, зокрема органічний азот, сірка, фосфор і комплекс амінокислот, залишаються зв'язаними у структурі кератину і практично не переходять у доступні форми, не беруть участі в біологічному кругообігу та не можуть бути використані рослинами.

Природна деградація пташиного пір'я характеризується низькою швидкістю й обмеженою біологічною ефективністю, що зумовлено резистентною структурою кератину та недостатньою активністю природних кератинолітичних мікроорганізмів. Тривалість мінералізації у різних ґрунтово-кліматичних умовах свідчить про необхідність застосування керованих біотехнологічних методів переробки пір'я, зокрема біоконверсії з використанням кератинолітичних бактерій, актиноміцетів та грибів, а також спеціалізованих ферментних препаратів. Це дозволяє багаторазово прискорити процес деструкції, вивільнити зв'язані поживні елементи та трансформувати пір'я у

високоякісний агрономічно цінний продукт, придатний для ефективного використання в системах сталого агровиробництва [12].

1.4. Хімічний склад і біологічна цінність пташиного пір'я

Пташине пір'я є високомолекулярним органічним матеріалом, у складі якого домінує фібрилярний білок β -кератин. Його унікальні властивості визначаються хімічною природою цього білка, оскільки кератин характеризується високою концентрацією структуроутворювальних амінокислот, наявністю міцних поперечних зшивок і значною кількістю дисульфідних зв'язків. У середньому пір'я містить 82–93 % білків, незначну кількість ліпідів (1–2 %), зольних компонентів (1–2 %) та залишкову вологу. Основною структурною одиницею кератину є амінокислота загальної формули $H_2N-CHR-COOH$, де радикал R визначає функціональні властивості молекули. Амінокислоти в поліпептидному ланцюгу з'єднані пептидними зв'язками $-CO-NH-$, що формують основу білкової структури. Для кератину пір'я характерна висока частка амінокислот, які стабілізують його вторинну та третинну структури. Значну роль відіграє серин ($HO-CH_2-CH(NH_2)-COOH$), частка якого може сягати 16 %, а також пролін ($NH-(CH_2)_3-CH-COOH$), валін ($(CH_3)_2CH-CH(NH_2)-COOH$), аланін ($CH_3-CH(NH_2)-COOH$) і гліцин ($H-CH(NH_2)-COOH$). Найважливішими для формування тривимірної структури є цистеїн ($HS-CH_2-CH(NH_2)-COOH$) та його окиснена форма — цистин, який утворює дисульфідний зв'язок $-S-S-$, що з'єднує поліпептидні ланцюги й забезпечує їхню високу механічну та хімічну стабільність. Цистинові містки у вигляді $HOOC-CH(NH_2)-CH_2-S-S-CH_2-CH(NH_2)-COOH$ є основним елементом, що робить кератин практично нерозчинним у воді та стійким до дії протеолітичних ферментів, тому пір'я в природних умовах розкладається надзвичайно повільно.

Елементний склад пір'я також є індикатором його поживної цінності. Типовий β -кератин містить близько 64–65 % вуглецю (C), 6–7 % водню (H), понад 20 % кисню (O), 10–11 % азоту (N) та 2–3 % сірки (S). Висока концентрація азоту робить продукти біоконверсії пір'я важливим джерелом органічних азотних форм для рослин, тоді як наявність сірки сприяє формуванню білкового обміну і підсилює механізми стресостійкості рослинних організмів. У складі зольної частини пір'я трапляються важливі мінеральні компоненти, серед яких переважають сполуки фосфору та кальцію. Типовими є фосфати кальцію $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$, гідрофосфати CaHPO_4 і MgHPO_4 , а також карбонати CaCO_3 і MgCO_3 та оксиди типу Fe_2O_3 . Хоча мінеральна частка невелика, біологічне значення фосфору є надзвичайно високим, адже фосфорні сполуки після мікробного розкладу стають доступними для засвоєння рослинами. Це особливо важливо на фоні глобального дефіциту легкодоступних фосфатів у ґрунтах і обмеженості ресурсів природних фосфоритів [13].

Складність і стабільність структури кератину зумовлені наявністю декількох типів хімічних взаємодій — пептидних зв'язків $-\text{CO}-\text{NH}-$, численних водневих зв'язків ($\text{N}-\text{H}\cdots\text{O}=\text{C}$), дисульфідних містків $-\text{S}-\text{S}-$ та гідрофобних взаємодій між неполярними амінокислотними залишками (Ala, Val, Leu, Ile). Ці зв'язки формують стійку β -структуру, характерну для кератину пір'я, і забезпечують матеріалу високу температуру денатурації, низьку розчинність у кислотах і лугах та майже повну інертність до більшості природних ферментів. У результаті навіть у сприятливих умовах ґрунту розкладання пір'я відбувається дуже повільно [14].

Попри це, саме складність структури кератину визначає високу цінність продуктів його біоконверсії. Ферментативний або мікробний гідроліз кератину приводить до утворення вільних амінокислот, пептидів, азотовмісних органічних сполук і навіть фітогормоноподібних речовин. Деякі мікроорганізми, здатні розкладати кератин, продукують індол-оцтову кислоту — природний стимулятор росту рослин. Таким чином, продукти біоконверсії пір'я виконують подвійне функціональне навантаження: слугують джерелом поживних елементів

(C, N, S, P) та діють як біостимулятори, підвищуючи стійкість рослин до стресових факторів, таких як посуха, високі температури і тривале зневоднення.

Хімічний склад пташиного пір'я — сукупність білкових структур, сформованих амінокислотами з формулами $\text{HO-CH}_2\text{-CH(NH}_2\text{)-COOH}$, $\text{CH}_3\text{-CH(NH}_2\text{)-COOH}$, $\text{H-CH(NH}_2\text{)-COOH}$, $\text{HS-CH}_2\text{-CH(NH}_2\text{)-COOH}$ та іншими, а також дисульфідні зшивки -S-S- , пептидні групи -CO-NH- , мінеральні компоненти $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$, CaCO_3 , MgHPO_4 — роблять цей матеріал надзвичайно стійким, але водночас і цінним ресурсом для перетворення в органічні добрива і біологічно активні речовини. Тому біоконверсія пташиного пір'я є перспективним напрямом екологічно орієнтованого агровиробництва, який дозволяє перетворити складний специфічний відхід на високоякісний агрохімічний продукт [15].

1.5 Джерело фосфору для агроєкосистем

Питання забезпечення агроєкосистем доступним фосфором є особливо актуальним в умовах глобального виснаження природних фосфоритних родовищ та зростання вартості техногенно вироблених фосфорних добрив. Альтернативні джерела фосфору, які одночасно можуть зменшувати екологічний тиск відходів тваринництва, становлять значний науковий і практичний інтерес. У цьому контексті пташине пір'я розглядається як перспективна вторинна сировина, що поєднує високу концентрацію органічних речовин, амінокислот і низку мінеральних компонентів, серед яких фосфор, кальцій і магній. Попри те, що фосфор становить відносно невелику частку загального складу пера, його мобілізація відбувається у тісному взаємозв'язку з руйнуванням органічної матриці кератину, що забезпечує поступове й пролонговане збагачення ґрунту доступними фосфатами [16].

Кератин — надзвичайно стабільний біополімер, у структурі якого переважають амінокислоти, багаті на сірковмісні групи, передусім цистеїн, що формує численні дисульфідні зв'язки. За даними Цзінвен Цю з відділення хімії білків та технології ферментів кафедри біотехнології та біомедицини технічного університету Данії, амінокислотний вибір кератину визначає його фізіологічні та хімічні властивості, а також поведінку цього субстрату при деструкції. Висока частка гідрофобних амінокислот (валін, ізолейцин, лейцин), амідних залишків (глутамін, аспарагін) та функціональних груп, що можуть піддаватися фосфорильованню, створює основу для утворення фосфопротеїнів — білкових структур, здатних зберігати фосфор у органічно зв'язаній формі. Саме наявність фосфорильованих амінокислот, передусім серину й треоніну, вказує на можливість акумуляції фосфору у білковій структурі пера, який за нормальних умов залишається недоступним для рослин і мікробів. Тільки після початку ферментативної деградації ці органічно пов'язані форми поступово гідролізуються, що стає джерелом фосфатів для ґрунтової біоти [17].

Біохімічні процеси мікробної деградації кератину, на думку Терези Корнілович-Ковальської з університету природних наук в Любліні, мають комплексний характер і включають не лише протеоліз, але й окисно-відновні реакції, що руйнують дисульфідні зв'язки, полегшуючи доступ ферментів до внутрішніх шарів волокон. Інтенсивність руйнування органічної матриці безпосередньо визначає швидкість мобілізації мінеральних компонентів, включно з фосфором. Важливо, що кератинолізуючі мікроорганізми продукують широкий спектр ферментів: від специфічних кератиназ та ендопротеаз до фосфатаз, ліпаз та оксидоредуктаз. Робота Цзінвен Цю підтверджує, що ферментарний апарат бактерій роду *Bacillus* та актиноміцетів здатний одночасно розщеплювати білкові структури та супутні органічні комплекси, що прискорює вивільнення фосфору та інших мікроелементів. Це свідчить про наявність інтегрованих ферментативних шляхів, які забезпечують комплексну деградацію пера — від первинного руйнування волокон до мобілізації мінеральних залишків.

Ферментативні процеси у компостах, що містять пір'я, мають свою специфіку. Як показують численні спостереження, додавання пір'я до компостної маси стимулює активність ґрунтових мікроорганізмів, що продукують фосфатази. Підвищення активності як кислої, так і лужної фосфатази свідчить про активну мінералізацію органічних форм фосфору, що inherent у кератиновій матриці. Цей процес посилюється завдяки тому, що пір'я виступає не лише джерелом органічного субстрату, але також здатне формувати мікроосередки з підвищеним вмістом органічного азоту, які стимулюють розвиток мікроорганізмів, відповідальних за гідроліз фосфорорганічних сполук. Таким чином, компости з додаванням пера демонструють вищу ферментативну активність і збільшений вміст доступних фосфатів у фінальному продукті порівняно з традиційними рослинними компостами [18].

Амінокислотний склад пера також впливає на поведінку фосфору у процесі біоконверсії. Наявність амінокислот із потенціалом фосфорилування створює додаткові місця зв'язування фосфатів у білковій структурі, які звільняються лише після глибокого протеолізу. Крім того, глутамінова та аспарагінова кислоти здатні утримувати катіони кальцію та магнію, що стабілізують фосфатні групи. У цьому контексті вивільнення фосфору із пір'яної маси є частиною більш складного процесу, пов'язаного з декомпозицією білково-мінерального комплексу. Поступовий характер цього процесу є важливою агрохімічною перевагою, оскільки забезпечує неривчасте надходження фосфору в агроecosystemу [19].

Слід також враховувати, що кератинові відходи містять частку мінеральних компонентів (3–5%), у яких фосфор може бути представлений у вигляді ортофосфатів кальцію та магнію. За умов мікробної деградації ці форми частково переходять у більш доступні для рослин водорозчинні фосфати. Додатковим позитивним фактором є те, що органічні кислоти, які утворюються у процесі ферментації пера, знижують локальний рН компостної маси, сприяючи розчиненню малорухомих фосфатів. Така взаємодія біохімічних і хімічних процесів робить перо складним, але значним джерелом доступного фосфору.

Таким чином, пташине пір'я можна розглядати як природний компонент циркуляторної системи фосфору, який здатний зменшити залежність агровиробництва від мінеральних фосфорних добрив. Завдяки специфічному хімічному складу, високому вмісту амінокислот, здатних утримувати мінеральні елементи, та комплексній ферментативній деструкції, пір'я здатне мобілізувати фосфор у форму, доступну для ґрунтової біоти та рослин. Біоконверсія пера створює умови для поступового вивільнення фосфору, що має стратегічне значення для агросистем із дефіцитом доступного фосфору. У результаті пір'яні відходи постають не лише як екологічна проблема, але й як цінний ресурс, що може бути ефективно інтегрований у систему сталого агровиробництва [20].

1.6. Фосфор у системі мінерального живлення рослин

Фосфор належить до числа основних макроелементів мінерального живлення рослин і відіграє винятково важливу роль у забезпеченні росту, розвитку та формуванні врожайності сільськогосподарських культур. Його біологічне значення зумовлене безпосередньою участю у ключових біохімічних процесах енергетичного, пластичного та інформаційного обміну в рослинному організмі. На відміну від азоту й калію, які часто надходять у ґрунт у відносно мобільних формах, фосфор характеризується складним циклом трансформацій, обмеженою рухливістю в ґрунтовому середовищі та значною залежністю від фізико-хімічних властивостей ґрунту [21].

У рослин фізіологічно доступними формами фосфору є переважно ортофосфат-іони: H_2PO_4^- та HPO_4^{2-} .

Співвідношення між цими формами визначається реакцією ґрунтового розчину. За слабкокислих і нейтральних умов домінує іон H_2PO_4^- , який є найбільш доступним для поглинання кореневою системою, тоді як у лужних умовах переважає HPO_4^{2-} . Процес надходження фосфору в рослини відбувається

переважно шляхом активного транспорту через мембрани корневих клітин із залученням специфічних фосфатних переносників, енергія для функціонування яких забезпечується аденозинтрифосфатом (АТФ).

Фосфор входить до складу цілої низки життєво важливих органічних сполук рослинного організму. Передусім це нуклеотиди та нуклеїнові кислоти:

ДНК (Дезоксирибонуклеїнова кислота), РНК (Рибонуклеїнова кислота) які забезпечують збереження та реалізацію спадкової інформації. Крім того, фосфор є обов'язковим структурним компонентом молекул АТФ: $C_{10}H_{16}N_5O_{13}P_3$, який є універсальним акумулятором і переносником енергії у всіх біохімічних процесах клітини. Через систему: $АТФ \leftrightarrow АДФ + P_i + \text{енергія}$ здійснюється регуляція процесів фотосинтезу, дихання, синтезу вуглеводів, ліпідів та білків. Таким чином, фосфор безпосередньо визначає рівень енергозабезпечення рослин, інтенсивність росту та формування генеративних органів.

Важливою є також роль фосфору у структурі клітинних мембран. Він входить до складу фосфоліпідів, які будують ліпопротеїнові матриці біологічних мембран і зумовлюють їхню проникність, стабільність та функціональну активність. За дефіциту фосфору порушуються процеси транспорту речовин, іонний гомеостаз та осмотичний баланс клітин [22].

Фосфор істотно впливає на формування кореневої системи, ранній розвиток рослин і прискорення фаз онтогенезу. За достатнього фосфорного живлення спостерігається активізація росту коренів, підвищення інтенсивності кушіння у злакових культур, посилення цвітіння та формування зав'язі у плодових і овочевих рослин. Також фосфор підвищує стійкість рослин до несприятливих чинників довкілля, зокрема до низьких температур, посухи та ураження хворобами.

У ґрунті фосфор перебуває у складній системі мінеральних та органічних форм. До мінеральних сполук належать фосфати кальцію, заліза та алюмінію: $Ca_3(PO_4)_2, FePO_4, AlPO_4$, які характеризуються низькою розчинністю й обмеженою доступністю для рослин. Органічні форми фосфору представлені фітином, фосфоліпідами, нуклеїновими кислотами та фосфопротеїнами. Для

переходу цих сполук у доступні форми необхідна активна участь ґрунтової мікробіоти та ферментів групи фосфатаз.

Вміст рухомого фосфору в ґрунтах України, зокрема у ґрунтах Черкаської області, має значні просторові коливання та часто є недостатнім для повної реалізації потенціалу врожайності сільськогосподарських культур. Це зумовлює високу залежність агровиробництва від застосування мінеральних фосфорних добрив. Однак тривале використання виключно мінеральних форм фосфору призводить до порушення балансу поживних елементів, накопичення важкорозчинних сполук у ґрунті та зниження коефіцієнта використання елемента рослинами [23].

Особливого значення набувають альтернативні джерела фосфору органічного походження, зокрема продукти біоконверсії відходів птахівництва. Пташине пір'я містить не лише азот і сірку, але й органічно зв'язаний фосфор, який у процесі ферментативної та мікробної деградації переходить у доступні фосфатні форми: $R-PO_4^{2-} \rightarrow H_2PO_4^-$.

Це забезпечує поступове, пролонговане надходження фосфору в ґрунтовий розчин без різких пікових концентрацій, що характерні для мінеральних добрив.

Особливо важливою є синергія між фосфатами та амінокислотами, які утворюються під час біоконверсії пір'я. Амінокислоти здатні утворювати хелатні комплекси з іонами фосфору, стабілізувати їх у ґрунтовому розчині та підвищувати коефіцієнт засвоєння коренями рослин. Такий механізм істотно підвищує ефективність використання фосфору та знижує його фіксацію у важкодоступні сполуки.

Фосфор тісно пов'язаний із вуглецевим та азотним обмінами в рослинному організмі. Оптимальне фосфорне живлення забезпечує ефективне включення азоту в синтез амінокислот і білків, а також регулює транспорт асимілянтів від листків до органів запасання. Саме тому нестача фосфору часто проявляється не лише у пригніченні росту, а й у характерному фіолетовому забарвленні листків, затримці цвітіння та зниженні врожайності.

Таким чином, фосфор є одним із ключових регуляторів продукційного процесу рослин, елементом енергетичного забезпечення клітин, структурним компонентом мембран і нуклеїнових кислот. В умовах сучасного агровиробництва особливо зростає значення органічних форм фосфору, здатних включатися в біологічний кругообіг без негативного впливу на ґрунтову екосистему [24].

1.7. Екологічні аспекти переробки органічних відходів птахівництва

Органічні відходи птахівництва становлять значний екологічний виклик для агроекосистем, оскільки їх накопичення у великих обсягах супроводжується ризиками забруднення ґрунтів, водних ресурсів і атмосфери. Найпоширенішими видами таких відходів є пташиний послід, підстилка, залишки кормів та особливо пташине пір'я, яке містить до 90% кератину і надзвичайно стійке до природної деградації. У традиційних технологіях утилізації акцент робився переважно на компостуванні пташиного посліду, проте сучасні екологічні дослідження свідчать про те, що компостування, попри його поширеність, є процесом із великим вуглецевим слідом. Мінералізація органічних компонентів посліду супроводжується інтенсивними викидами CO₂, аміаку та закису азоту — газів, що мають високий глобальний потеплювальний потенціал. Нерідко у компостній масі втрачається до половини загального азоту, що зменшує агрономічну цінність кінцевого продукту та водночас погіршує екологічний баланс технології [25].

На мікробному рівні компостування є складним процесом сукцесії бактерій та грибів, які поетапно змінюють один одного залежно від температури, вологості й хімічного складу субстрату. Дослідження свідчать, що при компостуванні органічної сировини, зокрема відходів на основі лігноцелюлозних матеріалів, у компості формується кілька хвиль мікробного

розвитку. На початкових стадіях активно ростуть мезофільні бактерії, проте у термофільну фазу переважають термостійкі протеолітичні популяції. При цьому грибні угруповання відіграють ключову роль у розщепленні полімерних сполук і відзначаються широким таксономічним розмаїттям, серед якого виявляються представники родів *Penicillium*, *Microascus*, *Gibellulopsis* та інші. Різноманіття грибів поступово зменшується в міру дозрівання компосту, що свідчить про адаптацію до зменшення доступного субстрату [26].

Особливо цінні дані отримані у дослідженнях динаміки сукцесії мікробних груп під час компостування пир'яних відходів у поєднанні з рослинною біомасою. Науковцем Хуаном Антоніо Лопес-Гонсалесом з кафедри біології та геології, університету Альмерії агропродовольчого кампусу міжнародної досконалості в Іспанії було встановлено, що протягом перших двох тижнів компостування домінують бактерії, включаючи актиноміцети, які активно розкладають легкодоступні білкові субстрати. Проте з 4–6-го тижня бактеріальні популяції поступово заміщуються грибами, серед яких спочатку переважають мезофільні та термофільні целюлолітичні види, а вже на шостому тижні з'являються кератинолітичні штами, здатні до утилізації власне кератину. Цей структурований перехід від бактеріального до грибного розкладання свідчить про складну екологічну організацію процесу та важливість співвідношення C/N, яке виявилось оптимальним на рівні 25. Саме за цього співвідношення було зафіксовано найвищу ферментативну активність і найшвидший темп розкладання пир'яної біомаси [27].

Кератин, який становить основу пташиного пир'я, є білком, стійким до дії стандартних протеаз. Його стабільність пов'язана із високим вмістом дисульфідних зв'язків, що робить розкладання пир'я у природних умовах повільним і малоефективним. Лише спеціалізовані мікроорганізми — окремі види бактерій роду *Bacillus*, актиноміцети роду *Streptomyces*, а також кератинолітичні гриби (*Trichophyton*, *Microsporum*, *Arthroderma*, *Chrysosporium*, *Myceliophthora*) — здатні до ефективного руйнування кератину. У грибів цей процес включає не лише протеолітичний лізис, але й механічне руйнування

кератинових структур за допомогою перфоруючих органів. Бактерії ж здійснюють деградацію виключно ферментативним шляхом.

У дослідженнях компостування пір'яної сировини показано, що розкладання кератину кератинолітичними грибами каталізується позаклітинними сериновими протеазами та включає реакції сульфїтолізу, під час яких розщеплюються дисульфїдні зв'язки білкової структури. Кінцевим продуктом цієї реакції є сульфатні форми сірки, що свідчить про повноцінну мінералізацію сірковмісних амінокислот. Саме на цьому етапі відбувається формування найбільш цінних продуктів біоконверсії — амінокислотних гідролізатів та органо-мінеральних добрив, багатих на доступні форми азоту, сірки та фосфору [28].

Порівняно із традиційним компостуванням пташиного послїду, яке супроводжується значним вуглецевим слїдом, утворенням амїачних випарів та підвищеним ризиком втрат мінеральних компонентів, переробка пір'я є екологічно вигіднішою. Біоконверсія пір'я відбувається повільніше, але значно контрольованіше, а головне — без масового вивільнення CO₂. Це зумовлено тим, що кератинова структура розкладається поступово, а мінералізація вуглецю та азоту відбувається у зв'язаних формах. Продуктами такої переробки є стабільні білково-мінеральні комплекси, які не спричиняють вторинного забруднення і цілком відповідають принципам «зеленої» утилізації відходів. Амінокислоти, що утворюються внаслідок ферментативного гідролізу кератину, є природними біостимуляторами, які підвищують стійкість рослин до посухи, суховійних явищ, високих температур та інших проявів кліматичних змін. Таким чином, пір'яні відходи перестають бути екологічним тягарем і перетворюються на цінний ресурс для сільського господарства [29].

Інтегрування сучасних біотехнологій у переробку птахівничих відходів дозволяє мінімізувати екологічні ризики і підвищити ефективність використання біологічних ресурсів. Традиційне компостування послїду, попри його поширення, поступається технологіям біоконверсії пір'я за екологічною безпекою, стабільністю процесу і якістю кінцевого продукту. Переробка пір'я

забезпечує значно нижчий вуглецевий слід, повне використання поживних елементів та виробництво добрив з високим вмістом амінокислот і органічного фосфору [30].

1.8 Біоконверсія органічних відходів

Біоконверсія органічних відходів є ключовою складовою сучасних екологічно безпечних технологій управління аграрними екосистемами, що базуються на раціональному використанні ресурсів і мінімізації антропогенного навантаження на ґрунт. На відміну від традиційних підходів, спрямованих переважно на мінералізацію органічної речовини, біоконверсія забезпечує цілеспрямовану трансформацію органічних субстратів у високоякісні добрива шляхом керованих мікробіологічних процесів, які активізуються за участю мікроорганізмів, ґрунтових безхребетних і ферментативних комплексів. Як підкреслено у джерелах, біоконверсійні продукти, включно з вермикомпостом та іншими формами біологічно активних органічних добрив, здатні значно підвищувати рівень енергетичних і біохімічних перетворень у ґрунті, забезпечуючи більш оптимальний режим живлення рослин і сприяючи відновленню природних властивостей агроекосистем [31].

Наукові дослідження засвідчують, що біоконверсія здатна компенсувати проблеми, пов'язані з надмірним застосуванням мінеральних добрив. Систематичне внесення виключно мінеральних добрив змінює напрям ґрунтових процесів у бік інтенсивної мінералізації, що може призводити до збіднення гумусу, зниження біологічної стійкості ґрунту та дисбалансу в роботі мікробних угруповань. Мікрофлора в таких умовах часто працює на межі стійкості, адже зміщення енергетичного рівня ґрунтової системи потребує «викиду» надлишкової енергії, що провокує порушення природної регуляції біологічних процесів.

Водночас застосування органічних добрив, отриманих шляхом біоконверсії, сприяє активізації мікробіологічних процесів, пов'язаних із гуміфікацією та стабілізацією органічної речовини, що є критично важливим для підтримання родючості [32].

Біоконверсія органічних відходів передбачає залучення комплексу природних механізмів трансформації речовини, серед яких ключову роль відіграють мікроорганізми – бактерії, актиноміцети та гриби. Органотрофна мікрофлора, що здатна гідролізувати білкові та інші органічні субстрати, відіграє вирішальну роль у деструкції складних органічних сполук. Її активність значною мірою залежить від співвідношення C:N, яке визначає темп синтезу мікробної біомаси та рівень перетворення органічної речовини. Оптимальним для інтенсивної біоконверсії вважається співвідношення C:N близько 25:1, за якого швидкість росту мікробної біомаси та накопичення гумусових речовин досягає максимальних показників [33].

У контексті використання продуктів біоконверсії у землеробстві вченими встановлено, що внесення таких добрив стимулює зростання чисельності органотрофів, азотфіксувальних та інших корисних груп мікроорганізмів, підвищуючи інтенсивність ґрунтових біохімічних процесів. Використання вермикомпосту (особливо в підвищених дозах) забезпечує формування в ґрунті більш сприятливого режиму мінерального та легкогідролізованого азоту, фосфору й калію порівняно з еквівалентними дозами мінеральних добрив

Вміст поживних елементів при цьому не лише підтримується, але й демонструє тенденцію до зростання, що є важливим чинником стабілізації родючості ґрунту за умов інтенсивного землеробства.

Процеси біоконверсії органічної речовини неможливо розглядати окремо від загальної концепції кругообігу поживних елементів у ґрунтових системах. Розкладання рослинних та тваринних решток є однією з ключових ланок кругообігу вуглецю й азоту, а ефективність цього процесу прямо залежить від активності ґрунтових організмів. Найбільша ефективність відтворення органічної речовини властива тим процесам, які проходять повний цикл

мінералізації–гуміфікації, що призводить до утворення стабільних органічних структур, здатних тривалий час підтримувати агрохімічний потенціал ґрунтів

Біоконверсія, на відміну від некерованої мінералізації, сприяє саме гуміфікаційним процесам, що забезпечує накопичення стійких гумусових речовин [34].

Окреме місце у технологічних схемах біоконверсії займає участь ґрунтових безхребетних, зокрема дощових черв'яків. Їх роль полягає у подрібненні, переміщенні та перетравленні органічних відходів, що забезпечує значне підвищення поверхні контакту органічної речовини з мікроорганізмами та прискорення процесів її розкладу. Діяльність ґрунтових безхребетних забезпечує покращення фізико-хімічних властивостей ґрунту, формування оптимального поживного режиму та підвищення біологічної активності, що є важливими чинниками процесу біоконверсії.

Застосування продуктів біоконверсії у системах удобрення забезпечує не лише агрохімічну ефективність, але й екологічні переваги. На відміну від традиційних методів утилізації органічних відходів, біоконверсія не супроводжується значним виділенням парникових газів, таких як CO_2 і NH_3 , оскільки перетворення органічної речовини здійснюється у контрольованих біотичних умовах. Біоконверсія сприяє зниженню енергетичного навантаження на ґрунтову систему та запобігає переходу мікробіологічних процесів у режим надмірної мінералізації, який є характерним для мінерального удобрення та компостування без біологічної регуляції [35].

У сівозмінах інтенсивного типу застосування продуктів біоконверсії має здатність підтримувати стабільний рівень основних поживних елементів у ґрунті та запобігати деградаційним процесам. Зокрема, у темно-сірому лісовому ґрунті, згідно з багаторічними даними, внесення вермикомпосту сприяє підвищенню вмісту азоту, фосфору та калію, особливо у період інтенсивного росту рослин, забезпечуючи кращі показники порівняно з мінеральними аналогами. Подвійні дози біоконверсійних продуктів забезпечували максимальні показники

елементів живлення серед усіх досліджуваних варіантів, що підтверджує високу агрономічну цінність таких добрив у системах інтенсивного овочівництва [36].

Біоконверсія органічних відходів є науково обґрунтованим та екологічно доцільним підходом до покращення якості ґрунтів, оптимізації живлення рослин та зменшення антропогенного навантаження на агросистеми. Залучення мікробних і зоогенно-детритних механізмів трансформації органічної речовини забезпечує стабілізацію гумусу, відновлення біологічної активності ґрунту та підвищення його родючості навіть в умовах інтенсивного землеробства. Біоконверсія не лише вирішує проблему утилізації органічних відходів, але й формує високоякісний продукт – біологічно активне добриво, яке стимулює розвиток рослин, покращує структуру ґрунту та відновлює порушені екосистемні зв'язки, що робить її однією з найбільш перспективних технологій сталого агровиробництва [37].

1.9 Світовий досвід використання продуктів біоконверсії

У світовій практиці біоконверсія органічних відходів набула статусу однієї з ключових технологій сталого розвитку агросектору, оскільки вона об'єднує екологічні, енергетичні та агрохімічні переваги. Продукти біоконверсії, включаючи вермикомпост, кератинові гідролізати, органо-мінеральні біодобрива, біогазові дигестати та амінокислотні екстракти, активно впроваджуються у сільськогосподарських системах більш ніж 80 країн світу. Стрімке розширення застосування цих технологій зумовлено глобальною тенденцією переходу до низьковуглецевого агровиробництва та необхідністю зменшення залежності від мінеральних добрив, ціни на які залишаються нестабільними та мають високу енергетичну складову [38].

За даними Продовольчої та сільськогосподарської організації ООН (FAO), у 2023 році загальний обсяг органічних відходів сільського господарства

у світі перевищив 1,4 млрд тонн, з яких понад 30 % припадає на тваринницькі комплекси. У країнах Європейського Союзу щороку утворюється понад 140 млн тонн органічних агровідходів, які підлягають біологічній переробці. Уже понад 65 % цих відходів проходять через процеси компостування, вермикомпостування або анаеробного зброджування. У скандинавських країнах цей показник сягає 80–90 %, що робить їх світовими лідерами у впровадженні біоконверсійних технологій [39].

У США біоконверсія розглядається як перспективний напрям утилізації побічних продуктів птахівництва та тваринництва. За даними USDA, щорічно утворюється близько 8,5 млн тонн пташиного посліду та понад 500 тис. тонн пір'я, що стимулює розвиток кератинолітичних технологій. Національна програма «Circular Agriculture Initiative» передбачає переробку 35 % відходів тваринницької галузі саме через біоконверсію до 2030 року. Кератинові гідролізати дедалі частіше використовуються не лише як високоякісні органічні добрива, а й як біостимулятори росту, у тому числі в умовах кліматичних стресів. Дослідження Університету Джорджії у 2021 році показали, що внесення 2–4 % кератинового гідролізату у ґрунт збільшує вміст легкогідролізованого азоту на 28–35 %, а врожайність овочевих культур — на 10–18 % [40].

У країнах Азії біоконверсія органічних відходів є одним із найдинамічніших напрямів розвитку «зеленої» економіки. Китай, Індія, Японія та Південна Корея активно впроваджують технології переробки агровідходів, зокрема тих, що важко розкладаються природним шляхом, таких як пташине пір'я, субпродукти тваринництва та лігноцелюлозні залишки. У Китаї щорічно утворюється понад 3 млн тонн пташиного пір'я, а ринок ферментативних кератиназ становить понад 500 млн доларів США з прогнозом зростання на 6–7% щорічно. Значна увага приділяється розробці комбінованих технологій біоконверсії, у яких кератинолітичні грибні та бактеріальні культури поєднуються з ферментними препаратами, що скорочує тривалість деградації кератину у 3–4 рази. У Японії продукти біоконверсії, зокрема амінокислотні

екстракти, широко використовуються у вирощуванні овочів та фруктів з високою доданою вартістю, де вимоги до екологічності продукції є особливо високими.

Європейський Союз демонструє найсистемніший підхід до формування ринку продуктів біоконверсії, що пов'язано з вимогами Європейського зеленого курсу (EU Green Deal) та стратегії «Farm to Fork», яка передбачає зменшення використання мінеральних добрив на 20 % до 2030 року. З цією метою стимулюється переробка органічних відходів у добрива з високою біологічною цінністю. Серед найактивніших країн — Німеччина, Данія, Нідерланди та Австрія, де рівень переробки сільськогосподарських органічних відходів перевищує 75 %. У Нідерландах понад 90 % тепличного овочівництва базується на внесенні орґано-мінеральних і біоактивних добрив, отриманих шляхом біоконверсії, що дозволило зменшити використання мінерального азоту на 40 % та фосфору — на 25 %. У Німеччині понад 950 біогазових комплексів використовують дигестат як основне органічне добриво, що містить доступний азот, фосфор та калій [41].

У Латинській Америці продукти біоконверсії відіграють ключову роль у відновленні родючості деґрадованих ґрунтів. У Бразилії та Аргентині вермикомпост широко застосовується у технологіях прямого посіву і в системах агролісомеліорації. У Колумбії та Мексиці ферментативні гідролізати з переробленого пір'я активно використовуються як органічні добрива у кавовому та банановому виробництвах. За оцінками Inter-American Institute for Cooperation on Agriculture, застосування продуктів біоконверсії дозволило знизити витрати на мінеральні добрива у фермерських господарствах на 18–25 %, водночас підвищивши стійкість агроєкосистем до посух [42].

В країнах Африки та на Близькому Сході біоконверсія стає важливим інструментом боротьби з деґрадацією ґрунтів та дефіцитом органічної речовини. В Ефіопії, Кенії та Марокко активно реалізуються програми переробки агровідходів через вермикомпостування, анаеробне зброджування та ферментацію. У країнах із посушливим кліматом особливо цінними є амінокислотні продукти біоконверсії, які використовуються як антистресові

препарати для підвищення стійкості рослин до водного дефіциту та високих температур. Дослідження університету Аддіс-Абеби у 2022 році показали, що внесення амінокислотних гідролізатів на основі переробленого пір'я підвищує врожайність зернових культур у посушливих регіонах на 12–16 %.

Світовий досвід переконливо демонструє, що продукти біоконверсії є ефективним інструментом заміщення традиційних добрив, зниження вуглецевого сліду сільського господарства та відновлення родючості ґрунтів. Тенденція до переходу від простого компостування до високотехнологічних біоконверсійних процесів — ферментативного гідролізу, мікробної сапротрофної деградації та мікробіологічної обробки субстратів — є домінуючою у країнах з високим рівнем технологічного розвитку. Цей досвід є надзвичайно важливим для адаптації подібних технологій в аграрному секторі України та, зокрема, Черкаської області, де накопичення органічних відходів птахівництва потребує науково обґрунтованих рішень для їх екологічно безпечної та економічно ефективної утилізації [43].

2 МАТЕРІАЛИ ТА МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕНЬ

2.1. Місце акумулювання органічних відходів

Місце акумулювання органічних відходів, що розглядається в межах даного дослідження, являє собою спеціально облаштований виробничо-технологічний комплекс площею 2,0 га, створений для локального збирання та використання пір'яної сировини і пташиного посліду без необхідності їх дальнього транспортування. Економічні особливості ринку побічної сировини птахівництва передбачають, що пташине пір'я є матеріалом з низькою вартістю у перерахунку на об'єм і масу, а отже, витрати на логістику при перевезенні на значні відстані перевищують потенційну вигоду. Тому більшість птахогосподарств регіону організують локальні виробничі цикли, де відходи одразу спрямовуються на переробку в межах територіально близьких підприємств [44].

Комплекс функціонує як локальний виробничий вузол, що приймає сировину тільки з навколишніх господарств Черкаської області. Такий підхід дає змогу уникати витрат, пов'язаних із централізованими міжрегіональними перевезеннями, а також забезпечує швидке надходження пір'я та посліду без ризику їх деградації під час транспортування. Водночас окремі виробники не мають можливості ефективно зберігати ці відходи у себе: пір'я характеризується дуже повільним природним розкладом через високий вміст кератину, а послід у свіжому стані супроводжується інтенсивними мікробіологічними процесами. Тому локалізована переробка є найбільш економічно й технологічно виправданою.

Територія комплексу має тверде водонепроникне покриття з армованого бетону, яке запобігає проникненню рідких фракцій у ґрунт. Система поверхневого дренажу зі стоками, виведеними у закриті відстійники, забезпечує контроль над можливими забрудненнями. Периметр майданчика огорожений, а на в'їзді обладнано контрольно-пропускний пункт з ваговим комплексом для фіксації маси кожної партії локально зібраної сировини [45].

Внутрішня інфраструктура складається з кількох функціональних зон для короткострокового зберігання різних видів відходів. Секції для пір'я виконані у вигляді легких навісів, що захищають його від опадів і сонячної радіації та зберігають необхідні фізико-механічні властивості до подальшої переробки. Конструкція навісів забезпечує природну вентиляцію, запобігаючи підвищеній вологості та розвитку небажаної мікрофлори. Пташиний послід акумулюється у більш ізольованих герметизованих контейнерах або бункерах, що зменшує інтенсивність газоутворення та обмежує вплив на довкілля.

Технологічна зона обладнана устаткуванням для первинної обробки відходів. Механічні подрібнювачі пір'я переводять кератинові структури у форму, придатнішу для подальших біотехнологічних перетворень. Поруч розташовані модульні барабанні змішувачі для гомогенізації маси, регулювання її вологості та формування стандартизованих партій матеріалу. Окремо облаштований майданчик для відбору проб оснащений водостійкими столами, ізоляційними контейнерами та обладнанням для експрес-оцінки сировини перед включенням її у технологічний цикл.

Для підготовленої сировини передбачені закриті приміщення з природною та примусовою вентиляцією, де підтримуються стабільні умови зберігання відповідно до вимог технологічного регламенту. Контрольована вологість, відсутність прямих сонячних променів і роздільне стелажне розміщення дозволяють працювати з матеріалами різної ступені подрібнення без втрати їх властивостей. На території додатково передбачені інженерні елементи: резервуар для технічної води, майданчик для техогляду транспорту, санітарні зони та майстерня.

Хоча на території можуть бути присутні традиційні компостувальні секції, вони виконують другорядну функцію, оскільки компостування пташиного посліду супроводжується суттєвими викидами CO₂ та поступається сучасним технологіям біоконверсії. Основний технологічний акцент комплексу спрямований на екологічно орієнтовані локальні процеси перетворення відходів, що дозволяють отримувати цінні продукти без необхідності транспортування низьковартісної сировини за межі регіону [46].

2.2. Джерела та особливості утворення органічних відходів

Органічні відходи, зокрема пташине пір'я, є невід'ємним побічним продуктом функціонування великих птахівничих підприємств і утворюються на кожному етапі вирощування, забою та первинної обробки птиці. У межах Черкаської області та прилеглих регіонів основними джерелами таких відходів є великі підприємства агропромислового комплексу, серед яких ПрАТ «Миронівська птахофабрика», ПРАТ «Оріль-Лідер» та ТОВ «Вінницька птахофабрика», що входять до складу агрохолдингу МХП — одного з найбільших виробників м'яса птиці в Україні [47].

У процесі інтенсивного вирощування курчат-бройлерів на таких підприємствах формується значна кількість відходів, серед яких пір'я складає близько 5–10 % від загальної маси тіла птиці. Така частка є типовою для промислового птахівництва за даними сучасних досліджень, оскільки період заміни пір'я пов'язаний з ростом, технічними процесами забою і обробки тушки.

На Миронівській птахофабриці, де застосовуються передові технології інтенсивного вирощування та автоматизовані лінії обробки, утворення пір'я відбувається при підготовці птиці до забою, коли після відділення пір'яної частини тушки значні маси волокнистого матеріалу переходять у стан побічного продукту. На підприємстві «Оріль-Лідер», розташованому в дельті річки Оріль та

інтегрованому в структуру МХП, процес накопичення пір'я відбувається на етапах первинної обробки м'яса, коли після забою та охолодження тушок відокремлені кератинові волокна не використовуються для подальшого харчового виробництва, але створюють значні обсяги відходів, що потребують подальшого збирання й утилізації [48].

Аналогічним чином, на Вінницькій птахофабриці, яка характеризується великими обсягами вирощування несучок та бройлерів і має інфраструктуру для обробки значних партій м'ясної продукції, пір'я виникає як побічний результат сортування, первинного очищення та пакування продукції на лініях забою. Масові виробничі цикли цих фабрик, що працюють як у постійному режимі протягом року, призводять до регулярного надходження тисяч тонн пір'я як відходу, що формується при кожному технологічному циклі забою.

Особливістю утворення таких відходів є те, що вони з'являються не лише під час безпосереднього процесу забою, але й у процесі вирощування птиці — під час природної линьки та механізованого видалення надлишкового пір'я на етапах передзабійної підготовки. Оскільки пір'я значною мірою складається з нерозчинного кератину, воно характеризується високою механічною стійкістю й повільним природним розкладанням, що унеможлиблює його тривале зберігання на виробничих майданчиках. У зв'язку з високою інтенсивністю виробничих циклів на зазначених підприємствах, пір'я регулярно вивозиться до централізованих пунктів акумулювання, де воно використовується як первинна сировина для подальшої механічної та біологічної обробки у процесах біоконверсії.

Систематичний збір цих відходів дозволяє контролювати екологічні ризики, пов'язані з накопиченням кератинових матеріалів, а також створює можливості для їх використання в агровиробництві як джерело азоту, вуглецю та фосфору після відповідної переробки [49].

2.3. Ґрунтово-кліматичні умови Черкаської області

Ґрунтовий покрив Черкаської області належить до зон типових і лучно-чорноземних ґрунтів Лісостепу України, які характеризуються високою родючістю та значним запасом органічної речовини. На більшій частині території переважають чорноземи типові, що формувалися на лесових відкладах і відзначаються глибоким родючим горизонтом, високим вмістом гумусу (у середньому 3,5–5,5 %) та значною водоутримуючою здатністю. Ці ґрунти мають структуровану, легко оброблювану текстуру, що забезпечує оптимальні умови для аерації, водообміну та розвитку ґрунтової мікрофлори [50].

У південних районах області поширені чорноземи опідзолені, які відзначаються дещо меншим вмістом гумусу та трохи більш щільною структурою, проте зберігають високі агрономічні властивості та добру водопроникність. У заплавних районах річок, таких як Дніпро та Тясмин, зустрічаються лучно-чорноземні ґрунти з підвищеним рівнем вологості та гумусу, які характеризуються високою продуктивністю при відповідному агротехнічному обробітку.

Характерною особливістю ґрунтів Черкащини є їхня здатність до акумуляції і утримання поживних речовин, що забезпечує стійкість сільськогосподарських культур до періодичних дефіцитів вологи. Проте інтенсивне використання земель, частий обробіток ґрунту та низька кількість органічних добавок у деяких районах спричиняють часткове виснаження родючого шару та зниження біологічної активності. У таких умовах надходження органічних матеріалів, зокрема продуктів переробки пташиного пір'я та інших відходів, здатне відновлювати баланс поживних речовин, покращувати структуру ґрунту та підвищувати його водоутримуючу здатність.

Ґрунти області відзначаються також різним ступенем механічного складу: від легкосуглинкових до середньо- та важкосуглинкових, що впливає на водопроникність, повітропроникність та швидкість мінералізації органічних речовин. Врахування цих показників є важливим при застосуванні органічних добрив і продуктів біоконверсії, оскільки ефективність засвоєння поживних елементів безпосередньо залежить від текстури та структури ґрунту [51].

Таким чином, ґрунтові умови Черкаської області поєднують високий природний агропотенціал із необхідністю підтримки органічного складу та структури ґрунту для забезпечення стійкої продуктивності сільськогосподарських культур. Високий рівень гумусу та сприятлива механічна структура створюють оптимальні передумови для використання органічних відходів, у тому числі пташиного пір'я, як додаткового джерела поживних речовин і стимулятора біологічної активності ґрунту.

Клімат Черкаської області належить до помірно континентального типу з чітко вираженою сезонністю та помірною кількістю опадів. Зими зазвичай м'які, з середньою температурою січня близько -5°C , а літній період теплий, із середньою температурою липня $19-20^{\circ}\text{C}$ та окремими періодами спеки понад 30°C . Середньорічна температура повітря складає близько $8-9^{\circ}\text{C}$, що забезпечує достатню тривалість вегетаційного періоду для вирощування більшості сільськогосподарських культур.

Середня річна кількість опадів коливається від 520 до 600 мм, із максимумом у травні–липні. Оподи переважно випадкові та нерівномірні за розподілом упродовж року, що іноді призводить до періодів нестачі вологи в ґрунті. Часті явища суховіїв у літні місяці, тривалі бездошові періоди та іноді сильні вітри створюють додатковий стрес для рослин і впливають на процеси мінералізації органічних речовин у ґрунті.

Порівняно помірний температурний режим у поєднанні зі стабільним сонячним опроміненням створює сприятливі умови для фотосинтетичної активності сільськогосподарських культур, а водний баланс ґрунтів, хоча й відносно стабільний, потребує регулювання через застосування органічних і

мінеральних добрив, особливо в посушливі періоди. Значна роль опадів та температури проявляється також у швидкості розкладання органічних решток, таких як пташине пір'я, і в ефективності біоконверсії, адже мікробіологічні процеси активніше відбуваються у вологому та теплому середовищі.

Вітровий режим регіону, зокрема переважаючі північно-західні та західні вітри, впливає на випаровування вологи з ґрунту та швидкість пересихання верхнього шару, що необхідно враховувати при плануванні внесення органічних матеріалів і добрив. Високі літні температури та нерівномірність опадів формують умови, коли органічні речовини збагачують ґрунт вологою та поживними елементами, підтримуючи його родючість і сприяючи стабільності агроєкосистем [52].

Кліматичні умови Черкаської області характеризуються сприятливим поєднанням температурного режиму та достатньої кількості опадів для ведення сільськогосподарського виробництва, проте вимагають уваги до регулювання водного балансу та застосування органічних матеріалів для підтримання родючості ґрунтів та оптимального розвитку культур упродовж року.

2.4. Методика проведення досліджень

Дослідження ефективності органічного добрива, отриманого шляхом компостування пташиного пір'я та подрібненої соломи у рідкому стані, виконувалися в умовах виробничих та експериментальних ділянок Черкаської області упродовж вегетаційного періоду у 2025 році. Вибір цього регіону зумовлений його типово лісостеповими ґрунтово-кліматичними умовами, що забезпечують можливість оцінити дію добрив у середовищі, характерному для більшості овочевих господарств центральної України. Компостована органічна суміш, яка слугувала основою для досліджень, виготовлялася на базі місцевих підприємств, що спеціалізуються на переробці органічних відходів птахівництва,

що дозволило забезпечити сталість складу добрива та контрольованість технологічних параметрів його отримання. Пташине пір'я та подрібнена солома проходили технологічний цикл компостування з одержанням рідкої органічної фракції, придатної до використання як ґрунтове добриво [53].

У дослідженнях було застосовано дві моделі культур, чутливих до органічного живлення, — томат і капуста. Для томату використовувалися гібриди Сагатан та Хепінет, а для капусти — Кеплер і Тореадор, які є добре адаптованими до умов Лісостепу і характеризуються середньо- та високопродуктивним потенціалом. Польові експерименти закладалися методом розщеплених ділянок із триразовою повторністю для кожного варіанта, що забезпечувало достатню статистичну точність отриманих результатів. Площа кожної облікової ділянки становила 25–30 м², що відповідало вимогам польової методики щодо репрезентативності даних і можливості коректного проведення вимірювань та збирання врожаю [54].

Органічне добриво застосовували у трьох нормах внесення: 3 т/га, 6 т/га та 10 т/га. Крім цього, передбачався контрольний варіант без внесення будь-яких органічних матеріалів, що дозволяло оцінити фактичний вплив досліджуваного добрива на ріст і розвиток культур. Рідке добриво рівномірно розподіляли по поверхні ґрунту з подальшим загортанням у верхній шар орного горизонту. Усі технологічні операції відповідали загальноприйнятій агротехніці для овочевих культур: передпосівний обробіток ґрунту, формування гряд, висаджування розсади томату та капусти, міжрядний обробіток, регулярні поливи, а також застосування рекомендованих заходів захисту рослин.

Протягом періоду вегетації проводили систематичні спостереження за ростом і розвитком рослин. До основних показників належали висота рослин, кількість листків, площа листової поверхні, інтенсивність наростання вегетативної маси та час переходу до генеративної фази. Окрему увагу приділяли оцінці стійкості рослин до абіотичних стресів, зокрема до підвищених температур та тимчасової нестачі вологи, оскільки ці фактори значною мірою впливають на якість і кількість урожаю томату та капусти. Також здійснювали

облік динаміки формування плодів і головок, що дозволяло простежити вплив різних норм внесення добрива на темпи розвитку продуктивних органів.

Збирання врожаю проводили вручну після досягнення рослинами технічної стиглості. Для кожної облікової ділянки визначали загальну масу продукції, середню масу плодів томату або головок капусти, а також частку товарної та нетоварної продукції. Додатково виконували аналіз якісних властивостей урожаю, зокрема визначали вміст сухої речовини, вітаміну С, нітратного азоту та цукрів, використовуючи чинні стандартизовані методики (ДСТУ 4138-2002, ДСТУ 4404-2003 та методи Мурі й Бертрана). Ці показники є ключовими при оцінці придатності продукції до реалізації та переробки [55].

Ґрунти дослідних ділянок належали до дерново-підзолистих, мали глинувату структуру та характеризувалися показниками, типічними для лісостепових ґрунтів: рН становив 5,8–6,2, вміст гумусу — 3,1–3,6 %, лужногідролізований азот — 90–115 мг/кг, рухомий фосфор — 100–125 мг/кг, обмінний калій — 85–120 мг/кг. Відбір ґрунтових зразків здійснювали з глибини 0–20 см із кількох точок кожної ділянки з подальшим перемішуванням для отримання усередненого зразка, що відповідало вимогам ДСТУ 4115-2002 та ДСТУ ISO 11464-2001.

Аналіз органічного добрива здійснювали у лабораторних умовах відповідно до методик ВНДІОТ (2003) та ДСТУ 4115-2002. Визначали показники, що характеризують придатність добрива до використання в рослинництві: вміст загального азоту, фосфору, калію, а також частку гумусу та амонійного азоту. Отримані дані дозволяли оцінити можливість використання рідкої компостованої суміші як джерела доступних елементів живлення та як органічного поліпшувача ґрунтової структури [56].

Статистичну обробку результатів здійснювали відповідно до методики математичної статистики за Б.А. Доспеховим. Це дало змогу отримати достовірні висновки щодо впливу органічного добрива з пташиного пір'я та соломи на продуктивність і якість вирощуваних культур, а також охарактеризувати доцільність його застосування в умовах центральної частини Лісостепу України.

3 РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ ТА ЇХ ОБГОВОРЕННЯ

3.1. Біометричні показники культур за дії органічного добрива

Вивчення впливу біопрепаратів на ріст і розвиток гібридів томата та капусти є надзвичайно актуальним напрямом сучасної агрономічної науки та біотехнології. У сучасних умовах інтенсивного землеробства особлива увага приділяється пошуку засобів, що здатні забезпечити високі показники продуктивності рослин при мінімізації негативного впливу на навколишнє середовище. Біологічні препарати виступають одним із ефективних інструментів для стимуляції ростових процесів, підвищення листкової поверхні, інтенсивності фотосинтезу та формування вегетативної маси рослин, що є ключовими чинниками підвищення урожайності і якості продукції.

Застосування біопрепаратів дозволяє значно зменшити потребу в хімічних добривах, що, у свою чергу, сприяє збереженню природного балансу ґрунтових екосистем, запобігає забрудненню ґрунтів та водних об'єктів, а також знижує ризик накопичення токсичних речовин у рослинній продукції. Це набуває особливої важливості в умовах сучасного аграрного виробництва, де спостерігається тенденція до надмірного використання мінеральних і синтетичних стимуляторів росту, що негативно впливає на біорізноманіття та здоров'я споживачів.

У таблиці 3.1 наведено дані про біометричну характеристику гібриду томата Сагатан за різних рівнів біопрепаратного навантаження

Таблиця 3.1 - Біометрична характеристика гібриду томата Сагатан за різних рівнів біопрепаратного навантаження

Показник	Контроль	Біопрепарат 3 т/га	Біопрепарат 6 т/га	Біопрепарат 10 т/га
Висота рослин, см (30 днів)	24,6	28,4	31,9	32,8
Висота рослин, см (60 днів)	61,3	72,8	81,6	83,2
Кількість листків, шт/рослину	14,2	16,8	18,9	19,1
Площа листкової поверхні, см ²	2150	2680	3120	3180
Середня швидкість росту, см/добу	0,61	0,74	0,83	0,84
Маса надземної частини, г/рослину	415	498	575	588

Експериментальні дані свідчать про виражений стимулювальний вплив біопрепарату на ріст і розвиток рослин гібриду томата Сагатан F1. Уже на 30-ту добу вегетації висота рослин у дослідних варіантах зростала порівняно з контролем: при 3 т/га – до 28,4 см (+15,4 %), при 6 т/га – до 31,9 см (+29,7 %), при 10 т/га – 32,8 см (+33,3 %), що вказує на наближення ефекту до фізіологічного плато. На 60-ту добу висота рослин також була більшою за контроль: 72,8 см (+18,8 %) при 3 т/га, 81,6 см (+33,1 %) при 6 т/га та 83,2 см (+35,7 %) при 10 т/га.

Кількість листків і площа листкової поверхні рослин також зростали з підвищенням дози препарату: листки – від 16,8 шт. (3 т/га) до 19,1 шт. (10 т/га), площа – від 2680 см² до 3180 см², що свідчить про інтенсифікацію фотосинтетичного апарату. Середня швидкість росту збільшувалася від 0,74 см/добу (3 т/га) до 0,84 см/добу (10 т/га), а маса надземної частини – від 498 г до

588 г, причому різниця між дозами 6 та 10 т/га була незначною, що вказує на оптимальну ефективність препарату при 6 т/га.

У таблиці 3.2 наведено дані про біометричну характеристику гібриду томата Хепінет за різних рівнів біопрепаратного навантаження.

Таблиця 3.2 - Біометрична характеристика гібриду томата Хепінет за різних рівнів біопрепаратного навантаження

Показник	Контроль	Біопрепарат	Біопрепарат	Біопрепарат
		3 т/га	6 т/га	10 т/га
Висота рослин, см (30 днів)	26,1	30,5	33,7	34,5
Висота рослин, см (60 днів)	65,8	77,4	86,9	88,1
Кількість листків, шт/рослину	15,1	17,6	20,1	20,3
Площа листової поверхні, см ²	2380	2940	3460	3510
Середня швидкість росту, см/добу	0,66	0,79	0,88	0,89
Маса надземної частини, г/рослину	448	534	622	635

Результати досліджень, наведені в таблиці свідчать про чітко виражений позитивний вплив біопрепарату на ріст і розвиток рослин гібриду томата Хепінет F1. Уже на початкових етапах онтогенезу встановлено істотну різницю між контрольним та дослідними варіантами. Так, на 30-ту добу вегетації висота рослин у контрольному варіанті становила 26,1 см, тоді як за внесення біопрепарату в дозі 3 т/га вона зростає до 30,5 см, що відповідає приросту на 16,9 %. Подальше підвищення дози до 6 т/га сприяло зростанню висоти до 33,7 см (+29,1 %), а за 10 т/га — до 34,5 см (+32,2 %), що вказує на уповільнення темпів приросту за максимального навантаження препаратом.

Аналогічна тенденція зберігалася і на 60-ту добу вегетації. У контрольному варіанті висота рослин становила 65,8 см, тоді як за застосування 3 т/га біопрепарату вона збільшувалася до 77,4 см (+17,6 %), за 6 т/га — до 86,9 см (+32,1 %), а за 10 т/га — до 88,1 см (+33,9 %). Це свідчить про пролонгований стимулювальний вплив біопрепарату на лінійний ріст рослин.

Кількість листків на рослині також істотно зростала під дією біопрепарату. В умовах контролю вона становила 15,1 шт./рослину, тоді як за доз 3, 6 та 10 т/га відповідно збільшувалася до 17,6 шт. (+16,6 %), 20,1 шт. (+33,1 %) та 20,3 шт. (+34,4 %). Підвищення облистненості рослин прямо зумовлювало зростання площі листової поверхні.

Площа листової поверхні в контрольному варіанті становила 2380 см², тоді як за внесення біопрепарату вона суттєво зростала: до 2940 см² (+23,5 %) при 3 т/га, до 3460 см² (+45,4 %) при 6 т/га та до 3510 см² (+47,5 %) при 10 т/га. Отримані дані вказують на значну інтенсифікацію формування фотосинтетичного апарату рослин у дослідних варіантах.

Середня швидкість росту рослин у контрольному варіанті становила 0,66 см/добу. За застосування біопрепарату цей показник зростав до 0,79 см/добу (+19,7 %) при 3 т/га, до 0,88 см/добу (+33,3 %) при 6 т/га та до 0,89 см/добу (+34,8 %) при 10 т/га. Максимальна інтенсивність ростових процесів, як і в попередньому випадку, спостерігалася за доз 6–10 т/га.

Маса надземної частини рослин, як інтегральний показник продуктивності росту, у контрольному варіанті становила 448 г/рослину. За внесення біопрепарату в дозах 3, 6 та 10 т/га вона зростала відповідно до 534 г (+19,2 %), 622 г (+38,8 %) та 635 г (+41,7 %). При цьому різниця між варіантами 6 і 10 т/га була мінімальною, що свідчить про досягнення найбільш ефективної норми застосування біопрепарату на рівні 6 т/га.

У таблиці 3.3 наведено дані про біометричну характеристику гібриду капусти Кеплер за різних рівнів біопрепаратного навантаження.

Таблиця 3.3 - Біометрична характеристика гібриду капусти Кеплер за різних рівнів біопрепаратного навантаження

Показник	Контроль	Біопрепарат	Біопрепарат	Біопрепарат
		3 т/га	6 т/га	10 т/га
Висота рослин, см (30 днів)	18,4	21,7	24,6	25,1
Висота рослин, см (60 днів)	42,9	50,8	58,2	59,0
Кількість листків, шт/рослину	10,8	13,2	15,7	16,0
Площа листкової поверхні, см ²	2980	3650	4320	4380
Середня швидкість росту, см/добу	0,43	0,49	0,56	0,56
Маса надземної частини, г/рослину	890	1040	1215	1230

Дослідження показали виражений позитивний вплив біопрепарату на ріст і розвиток рослин гібриду капусти Кеплер F1. Уже на 30-ту добу вегетації висота рослин у дослідних варіантах зростала від 21,7 до 25,1 см порівняно з 18,4 см у контролі, що свідчить про ранній стимулювальний ефект препарату. На 60-ту добу ця різниця ще більш посилювалася — висота рослин у варіантах з біопрепаратом досягала 50,8–59,0 см, у той час як у контрольному варіанті вона становила 42,9 см. Підвищувалася також кількість листків (до 16 шт. проти 10,8 шт. у контролі) та площа листкової поверхні (до 4380 см² проти 2980 см²), що сприяло формуванню більш потужного фотосинтетичного апарату рослин. Середня швидкість росту рослин зростала від 0,43 см/добу у контролі до 0,56 см/добу у варіантах із оптимальною нормою біопрепарату, а маса надземної частини збільшувалася від 890 г/рослину до 1215–1230 г. Найбільш виражений

ефект спостерігався за дозою 6 т/га, що вказує на досягнення оптимального рівня стимуляції ростових процесів і формування вегетативної маси.

У таблиці 3.4 наведено дані про біометрична характеристика гібриду капусти Тореадор за різних рівнів біопрепаратного навантаження.

Таблиця 3.4 - Біометрична характеристика гібриду капусти Тореадор за різних рівнів біопрепаратного навантаження

Показник	Контроль	Біопрепарат 3 т/га	Біопрепарат 6 т/га	Біопрепарат 10 т/га
Висота рослин, см (30 днів)	19,6	22,8	25,9	26,3
Висота рослин, см (60 днів)	45,1	53,6	61,4	62,0
Кількість листків, шт/рослину	11,6	14,1	16,4	16,6
Площа листкової поверхні, см ²	3150	3820	4510	4570
Середня швидкість росту, см/добу	0,47	0,54	0,59	0,60
Маса надземної частини, г/рослину	940	1105	1290	1315

Експериментальні дані свідчать про суттєвий позитивний вплив біопрепарату на ріст і формування вегетативної маси рослин гібриду капусти Тореадор F1. Уже на 30-ту добу вегетації встановлено достовірне збільшення висоти рослин у всіх дослідних варіантах порівняно з контролем. Так, у контрольному варіанті висота рослин становила 19,6 см, тоді як за внесення біопрепарату в дозі 3 т/га вона зростає до 22,8 см, що відповідає приросту на 16,3 %. За умови підвищення дози до 6 т/га висота рослин збільшувалася до 25,9 см (+32,1 %), а за 10 т/га — до 26,3 см (+34,2 %), що свідчить про поступове уповільнення темпів приросту за максимального навантаження препаратом.

Аналогічна закономірність простежувалася і на 60-ту добу вегетації. У контрольному варіанті висота рослин становила 45,1 см, тоді як у варіантах із застосуванням біопрепарату вона зростала до 53,6 см (+18,8 %) при 3 т/га, до 61,4 см (+36,1 %) при 6 т/га та до 62,0 см (+37,5 %) при 10 т/га. Отримані результати підтверджують пролонгований стимулювальний ефект біопрепарату на лінійний ріст рослин капусти.

Кількість листків на рослині також істотно залежала від рівня біопрепаратного навантаження. У контрольному варіанті цей показник становив у середньому 11,6 шт./рослину, тоді як за внесення 3 т/га він зростав до 14,1 шт. (+21,6 %), за 6 т/га — до 16,4 шт. (+41,4 %), а за 10 т/га — до 16,6 шт. (+43,1 %). Зростання облистненості сприяло формуванню більш розвиненого асиміляційного апарату.

Площа листової поверхні у контрольному варіанті становила 3150 см², тоді як за внесення біопрепарату вона достовірно зростала до 3820 см² (+21,3 %) при 3 т/га, 4510 см² (+43,2 %) при 6 т/га та 4570 см² (+45,1 %) при 10 т/га. Це свідчить про суттєве посилення фотосинтетичного потенціалу рослин під впливом біологічної стимуляції.

Середня швидкість росту рослин у контрольному варіанті становила 0,47 см/добу. За внесення біопрепарату в дозі 3 т/га вона збільшувалася до 0,54 см/добу (+14,9 %), за 6 т/га — до 0,59 см/добу (+25,5 %), а за 10 т/га — до 0,60 см/добу (+27,7 %). Максимальні значення цього показника спостерігалися у варіантах із дозами 6–10 т/га.

Маса надземної частини рослин у контрольному варіанті становила 940 г/рослину. За внесення біопрепарату в дозах 3, 6 та 10 т/га вона зростала відповідно до 1105 г (+17,6 %), 1290 г (+37,2 %) та 1315 г (+39,9 %). Як і у випадку з гібридом Кеплер F1, найбільш ефективною дозою біопрепарату щодо приросту вегетативної маси слід вважати норму 6 т/га, оскільки подальше підвищення дози не супроводжувалося істотним збільшенням біомаси.

У таблиці 3.5 наведено дані про основні фенологічні фази росту і розвитку рослин гібридів томата залежно від дії біопрепарату.

Таблиця 3.5 - Основні фенологічні фази росту і розвитку рослин гібридів томата залежно від дії біопрепарату.

Варіант досліджу	Гібрид	Тривалість періоду, діб від сходів до початку досягання			
		Бутонізація	Цвітіння	Утворення плодів	Досягання першого плода
Контроль	Сагатан	50	64	89	118
3 т/га		46	60	85	112
6 т/га		44	58	82	107
10 т/га		44	57	81	105
Контроль	Хепінет	48	62	87	115
3 т/га		45	59	83	110
6 т/га		43	56	80	104
10 т/га		42	55	79	102

У гібриду томата Сагатан F1 застосування біопрепарату прискорювало настання генеративних фаз: бутонізація відбувалася на 46–44-ту добу (контроль — 50-та), цвітіння — на 60–57-му добу (контроль — 64-та), формування плодів — на 85–81-шу добу (контроль — 89-та), а досягання першого плода скорочувалося з 118 до 112–105 діб залежно від дози.

Аналогічна тенденція спостерігалася у гібриду Хепінет F1, де бутонізація наступала на 45–42-гу добу (контроль — 48-ма), цвітіння — на 59–55-ту добу (контроль — 62-га), формування плодів — на 83–79-ту добу (контроль — 87-ма), а досягання першого плода скорочувалося з 115 до 110–102 діб.

Отже, біопрепарат прискорює розвиток рослин обох гібридів, забезпечує ранній перехід до генеративних фаз і скорочує строки досягання плодів. Найбільш ефективними були дози 6–10 т/га, тоді як підвищення дози понад 10 т/га додаткового ефекту не давало.

У таблиці 3.6 наведено основні фенологічні фази росту і розвитку гібридів капусти залежно від дії біопрепарату.

Таблиця 3.6 - Основні фенологічні фази росту і розвитку гібридів капусти залежно від дії біопрепарату.

Варіант досліджу	Гібрид	Тривалість періоду, діб від сходів до початку досягання			
		Формування розетки	Початок завивання головки	Технічна стиглість	Повна стиглість
Контроль	Кеплер	38	62	98	112
3 т/га		34	58	93	107
6 т/га		32	55	89	103
10 т/га		31	54	88	101
Контроль	Тореадор	36	60	95	109
3 т/га		33	56	91	105
6 т/га		31	53	87	101
10 т/га		30	52	86	99

Результати, наведені в таблиці 3.6, свідчать про суттєвий вплив біопрепарату на тривалість основних фенологічних фаз росту і розвитку рослин капусти, що проявлялося у прискоренні проходження міжфазних періодів та скороченні загального вегетаційного циклу обох досліджуваних гібридів.

У гібриду Кеплер F1 у контрольному варіанті формування розетки відбувалося на 38-му добу після сходів, тоді як за застосування біопрепарату цей процес прискорювався до 34 діб при дозі 3 т/га, 32 діб при 6 т/га та 31 доби при 10 т/га, тобто на 4–7 діб раніше порівняно з контролем. Початок завивання головки у контрольному варіанті відмічався на 62-гу добу, тоді як у дослідних варіантах — відповідно на 58, 55 та 54-ту добу. Настання фази технічної стиглості у контролі відбувалося на 98-му добу, тоді як за застосування біопрепарату — на 93 добу при 3 т/га, 89 добу при 6 т/га та 88 добу при 10 т/га.

Повна стиглість у контрольному варіанті наставала на 112-ту добу, тоді як у дослідних варіантах — на 107, 103 та 101-шу добу відповідно. Таким чином, загальна тривалість вегетаційного періоду гібриду Кеплер F1 скорочувалася на 5–11 діб.

Аналогічна закономірність простежувалася і у гібриду Тореадор F1, який загалом характеризувався дещо скоростиглішим розвитком. У контрольному варіанті формування розетки відбувалося на 36-ту добу, тоді як за внесення біопрепарату — на 33, 31 та 30-ту добу відповідно для доз 3, 6 та 10 т/га. Початок завивання головки у контролі настав на 60-ту добу, а в дослідних варіантах — на 56, 53 та 52-гу добу. Технічна стиглість у контрольному варіанті відмічалася на 95-ту добу після сходів, тоді як у варіантах із біопрепаратом — на 91, 87 та 86-ту добу. Повна стиглість у контролі наступала на 109-ту добу, тоді як за доз 3, 6 та 10 т/га — відповідно на 105, 101 та 99-ту добу, що свідчить про скорочення вегетаційного періоду на 4–10 діб.

Загалом встановлено, що застосування біопрепарату сприяло істотному прискоренню росту та розвитку рослин капусти, забезпечуючи більш ранній перехід до фаз формування товарної продукції. Найбільш виражений ефект встановлено за норм внесення 6–10 т/га, тоді як подальше підвищення дози супроводжувалося лише незначним додатковим скороченням тривалості фенологічних фаз, що свідчить про досягнення оптимального рівня біологічної дії препарату.

У таблиці 3.7 наведено дані про загальну кількість генеративних органів рослин томатів залежно від доз біопрепарату.

Таблиця 3.7 - Загальна кількість генеративних органів рослин томатів залежно від доз біопрепарату

Варіант досліджу	Гібрид	Кількість китиць,	Кількість квіток	Кількість плодів
Контроль	Сагатан	20,5	140	110
Біопрепарат 3 т/га		23,0	160	135
Біопрепарат 6 т/га		26,0	175	150

Біопрепарат 10 т/га		27,0	180	155
Контроль	Хепінет	22,0	135	105
Біопрепарат 3 т/га		24,5	150	125
Біопрепарат 6 т/га		27,5	165	140
Біопрепарат 10 т/га		28,0	170	145

Результати, наведені в таблиці свідчать про виражений стимулювальний вплив біопрепарату на формування генеративних органів рослин томатів гібридів Сагата та Хепінет. У контрольних варіантах обох гібридів спостерігалася нижча кількість китиць, квіток і плодів порівняно з дослідними варіантами, де застосовувався біопрепарат.

Зокрема, у гібрида Сагата F1 вже за внесення біопрепарату в дозі 3 т/га кількість китиць зросла з 20,5 до 23,0 шт., кількість квіток — з 140 до 160 шт., а кількість плодів — з 110 до 135 шт. Подальше збільшення дози до 6 т/га сприяло додатковому зростанню цих показників до 26,0 китиць, 175 квіток та 150 плодів, тоді як максимальна доза 10 т/га забезпечила незначне подальше збільшення (27,0 китиць, 180 квіток та 155 плодів), що свідчить про наближення ефекту до фізіологічного плато.

Схожа закономірність простежувалася і у гібрида Хепінет F1. У контрольному варіанті кількість китиць становила 22,0 шт., квіток — 135, а плодів — 105. Застосування біопрепарату сприяло поступовому зростанню генеративних органів: 3 т/га — 24,5 китиць, 150 квіток, 125 плодів; 6 т/га — 27,5 китиць, 165 квіток, 140 плодів; 10 т/га — 28,0 китиць, 170 квіток, 145 плодів.

Отримані дані підтверджують, що біопрепарат ефективно стимулює формування генеративних органів, збільшуючи кількість китиць, квіток та плодів, а оптимальний ефект досягається при дозах 6–10 т/га. Це свідчить про підвищення продуктивності рослин та потенційного врожаю томатів при застосуванні біологічної стимуляції.

У таблиці 3.8 наведено дані про загальну кількість генеративних органів рослин капусти залежно від доз біопрепарату.

Таблиця 3.8 - Загальна кількість генеративних органів рослин капусти залежно від доз біопрепарату

Варіант дослідження	Гібрид	Кількість китиць	Кількість квіток	Кількість плодів
Контроль	Кеплер	14,0	115	85
Біопрепарат 3 т/га		16,0	130	100
Біопрепарат 6 т/га		18,5	145	115
Біопрепарат 10 т/га		19,5	150	120
Контроль	Тореадор	15,0	118	88
Біопрепарат 3 т/га		17,0	135	103
Біопрепарат 6 т/га		19,0	150	118
Біопрепарат 10 т/га		20,0	155	123

Результати демонструють позитивний вплив біопрепарату на формування генеративних органів рослин капусти гібридів Кеплер і Тореадор. У контрольних варіантах обох гібридів кількість китиць, квіток і плодів була нижчою порівняно з дослідними варіантами, де застосовувався біопрепарат.

Для гібриду Кеплер F1 вже за внесення біопрепарату в дозі 3 т/га спостерігалось збільшення кількості китиць з 14,0 до 16,0 шт., квіток — з 115 до 130 шт., а плодів — з 85 до 100 шт. Подальше підвищення дози до 6 т/га забезпечило зростання до 18,5 китиць, 145 квіток та 115 плодів, тоді як максимальна доза 10 т/га сприяла ще більшому збільшенню показників (19,5 китиць, 150 квіток та 120 плодів), що вказує на наближення ефекту до оптимального рівня стимуляції.

Схожа закономірність спостерігалася у гібриду Тореадор. У контрольному варіанті кількість китиць становила 15,0 шт., квіток — 118, плодів — 88. Застосування біопрепарату сприяло поступовому зростанню: 3 т/га — 17,0

китиць, 135 квіток, 103 плоди; 6 т/га — 19,0 китиць, 150 квіток, 118 плодів; 10 т/га — 20,0 китиць, 155 квіток, 123 плоди.

Отримані дані підтверджують, що біопрепарат ефективно стимулює генеративний розвиток рослин капусти, забезпечуючи збільшення кількості китиць, квіток і плодів.

3.2 Вплив біопрепарату на врожайність культур

Урожайність рослин залежить від багатьох факторів, включаючи умови росту та застосування стимуляторів росту. Результати дозволяють оцінити тенденції росту та розвитку рослин, а також виявити оптимальні умови для підвищення продуктивності культур.

На рисунку 3.1 зображено дані про урожайність томату гібрида Сагатан залежно від норм внесення біопрепарату.

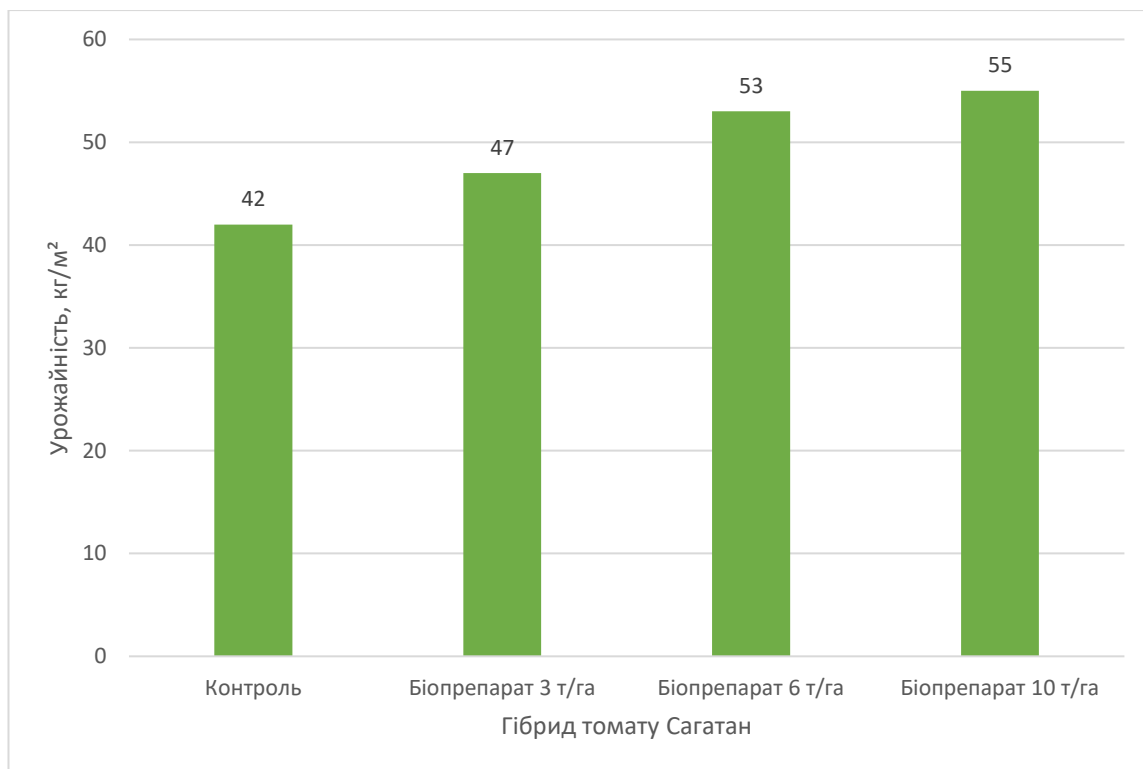


Рисунок 3.1 – Урожайність томату гібрида Сагатан залежно від норм внесення біопрепарату.

Отримані дані по гібриду Сагатан свідчать про виражений позитивний вплив біопрепарату на формування врожаю томатів. У контрольному варіанті середня урожайність становила 42 кг/м², тоді як внесення біопрепарату вже в дозі 3 т/га забезпечувало зростання продуктивності до 47 кг/м², що відповідає збільшенню на 12 %. Подальше підвищення дози до 6 т/га сприяло ще більшому підвищенню врожайності до 53 кг/м² (+26 % відносно контролю), тоді як максимальна доза 10 т/га забезпечувала приріст до 55 кг/м² (+31 %).

Ці результати свідчать про істотне стимулювальне дію біопрепарату на ростові та продуктивні процеси рослин гібриду Сагатан. Найбільш оптимальний ефект досягається при дозі 6 т/га, оскільки подальше збільшення до 10 т/га не призводить до пропорційного приросту урожайності, що вказує на наближення до фізіологічного максимуму потенціалу продуктивності. Загалом застосування біопрепарату забезпечує більш високі показники врожайності та може сприяти підвищенню ефективності вирощування томатів у досліджуваних умовах.

На рисунку 3.2 наведено дані про урожайність томату гібрида Хепінет залежно від норм внесення біопрепарату.

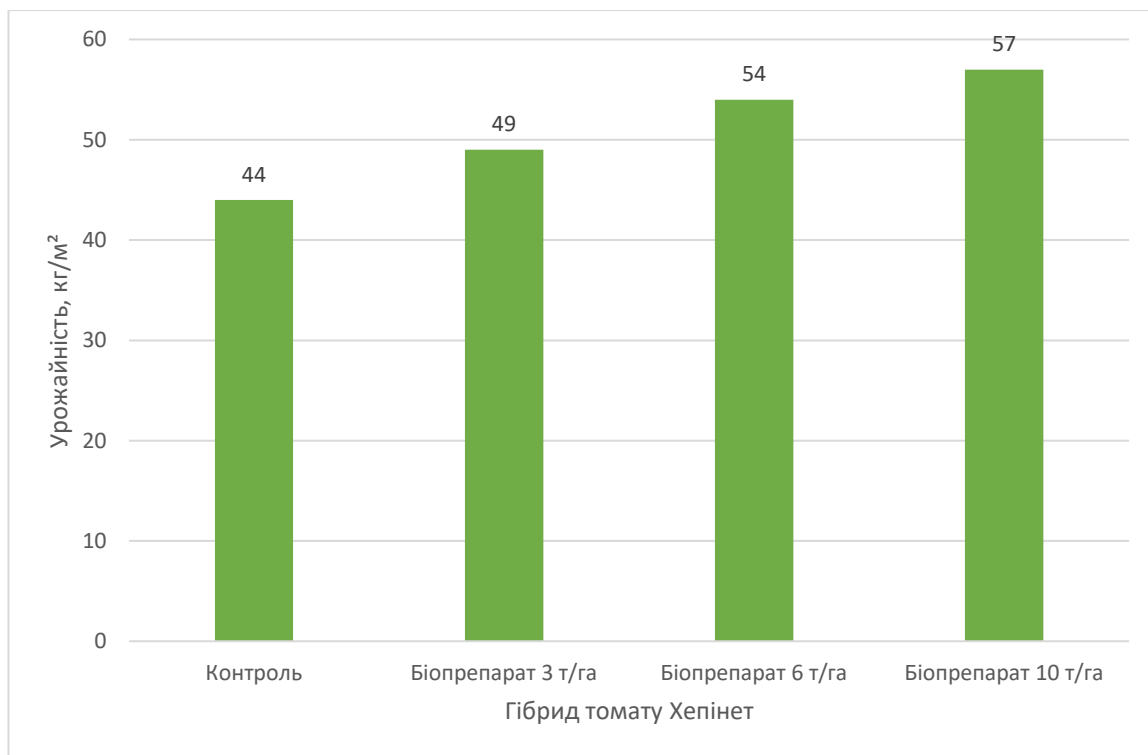


Рисунок 3.2 - Урожайність томату гібрида Хепінет залежно від норм внесення біопрепарату.

Отримані дані по гібриду Хепінет також свідчать про позитивний вплив біопрепарату на урожайність томатів. У контрольному варіанті середня урожайність становила 43 кг/м², тоді як за внесення біопрепарату в дозі 3 т/га вона зросла до 48 кг/м² (+11,6%). Підвищення дози до 6 т/га забезпечило ще більший приріст урожайності — до 54 кг/м² (+25,6%), а максимальна доза 10 т/га дозволила досягти 56 кг/м² (+30,2% відносно контролю).

Як і в гібриду Сагатан, найбільш ефективним виявився рівень 6 т/га, оскільки збільшення дози до 10 т/га давало лише незначне додаткове підвищення врожайності, що свідчить про наближення до фізіологічного максимуму продуктивності. Застосування біопрепарату сприяло прискоренню ростових процесів та формуванню більшої кількості генеративних органів, забезпечуючи стабільне підвищення продуктивності гібриду Хепінет.

На рисунку 3.3 наведено дані про урожайність капусти гібриду Кеплер залежно від норм внесення біопрепарату.

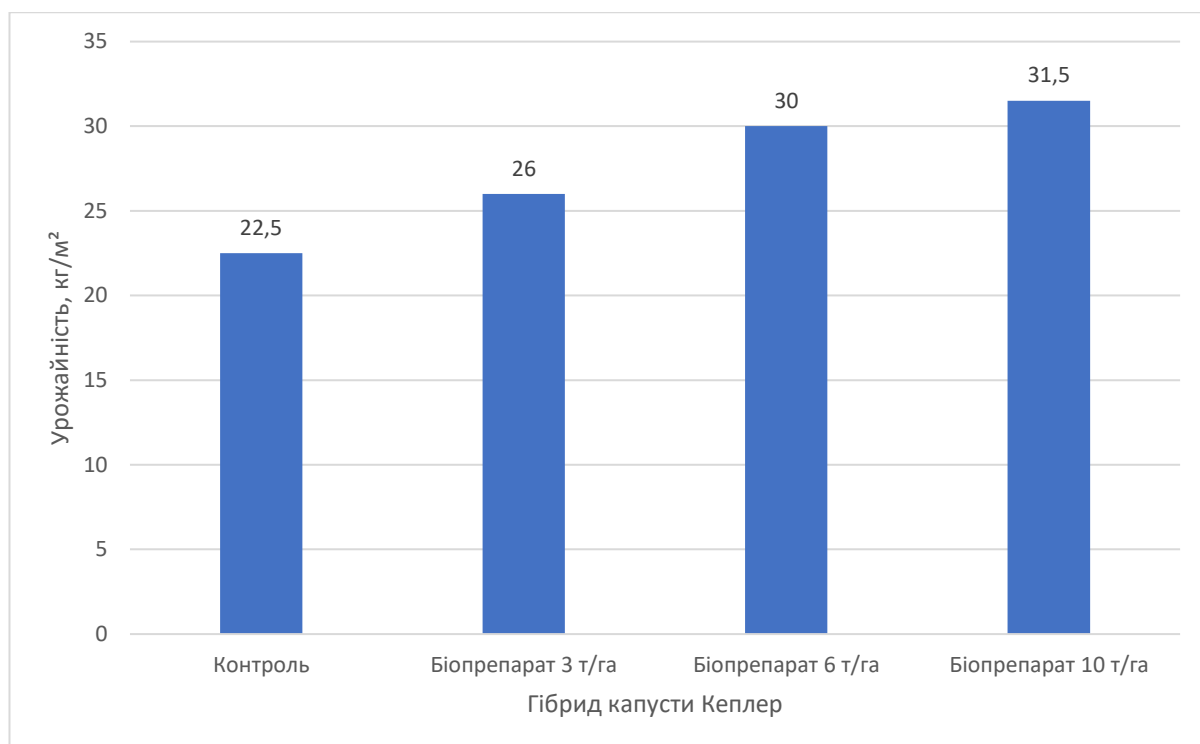


Рисунок 3.3 - Урожайність капусти гібриду Кеплер залежно від норм внесення біопрепарату

Результати досліджень свідчать, що внесення біопрепарату позитивно впливало на урожайність гібриду капусти Кеплер. У контрольному варіанті

урожайність становила 22,5 кг/м². Внесення біопрепарату у дозі 3 т/га сприяло збільшенню врожайності до 26,0 кг/м², що відповідає приросту +15,6% порівняно з контролем. Підвищення норми до 6 т/га забезпечило подальше зростання урожайності до 30,0 кг/м² (+33,3%), тоді як максимальна доза 10 т/га дала урожай 31,5 кг/м² (+40,0%), що вказує на прояв ефекту насичення.

Таким чином, застосування біопрепарату сприяло значному підвищенню продуктивності гібриду Кеплер, причому оптимальний ефект спостерігався за нормою 6–10 т/га, що дозволяє вважати цей рівень дозування найбільш ефективним для вирощування капусти в досліджуваних умовах.

На рисунку 3.4 наведено дані про урожайність капусти гібриду Торeadор залежно від норм внесення біопрепарату.

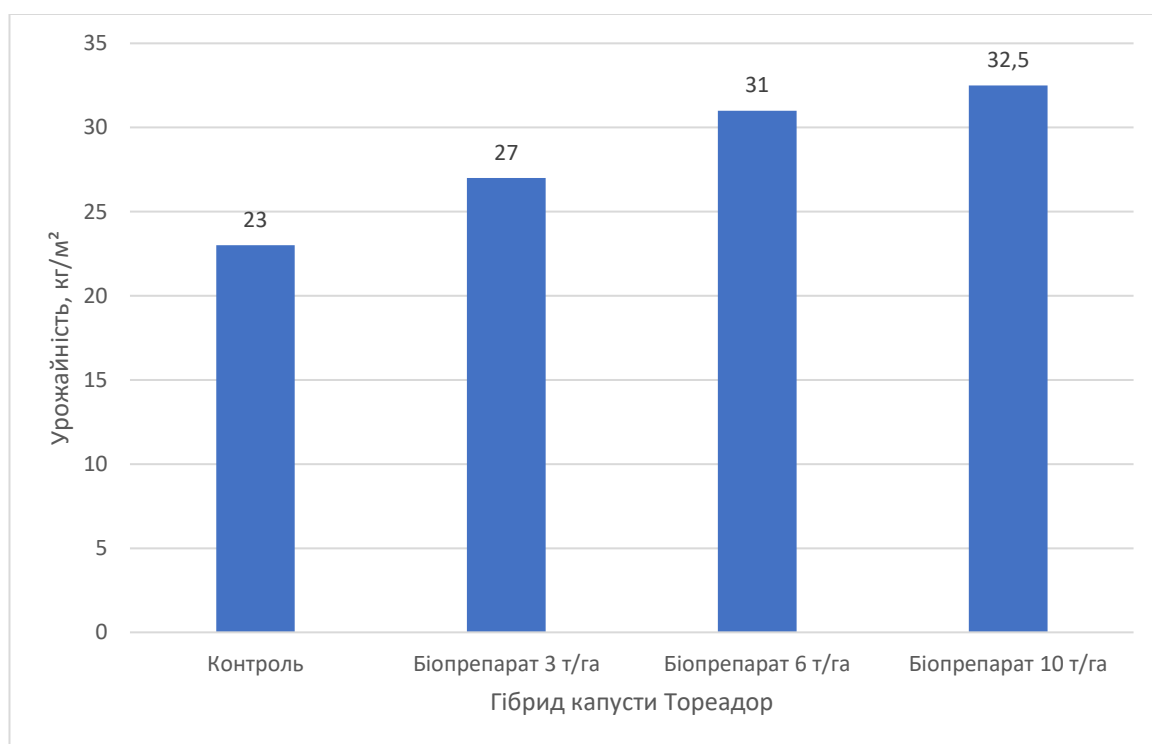


Рисунок 3.4 - Урожайність капусти гібриду Торeadор залежно від норм внесення біопрепарату

Результати досліджень показують, що внесення біопрепарату позитивно впливало на урожайність гібриду капусти Торeadор. У контрольному варіанті урожайність становила 23,0 кг/м². При застосуванні біопрепарату у дозі 3 т/га урожайність зросла до 26,5 кг/м² (+15,2%), а підвищення норми до 6 т/га забезпечило подальше збільшення врожайності до 30,5 кг/м² (+32,6%).

Максимальна доза 10 т/га сприяла досягненню врожайності 32,0 кг/м² (+39,1 %), що свідчить про прояв ефекту насичення.

Внесення біопрепарату сприяло істотному підвищенню продуктивності гібриду Торeadор, причому найбільш ефективним виявився рівень 6–10 т/га, який забезпечує оптимальний приріст врожаю у досліджуваних умовах.

3.3 Якісні параметри отриманої продукції

У сучасних умовах розвитку сільськогосподарського виробництва пріоритетним напрямом є не лише підвищення рівня врожайності культур, а й формування високої якості отриманої продукції, яка відповідала б вимогам екологічної безпеки, харчової цінності та технологічної придатності. Якісні показники рослинницької продукції, зокрема вміст сухих речовин, цукрів і органічних кислот, відіграють визначальну роль у формуванні її смакових властивостей, поживної цінності, стійкості до зберігання та придатності до переробки. Саме ці показники є інтегральним відображенням фізіолого-біохімічних процесів, що відбуваються в рослинах протягом вегетації.

Особливої актуальності набуває питання покращення якості продукції в умовах екологізації землеробства, яка передбачає зменшення антропогенного навантаження на агроecosистеми, обмеження використання синтетичних агрохімікатів та розширення застосування біологічних засобів регуляції росту і розвитку рослин. Біопрепарати, на відміну від традиційних мінеральних добрив і пестицидів, характеризуються низькою токсичністю, безпечністю для довкілля, ґрунтової мікрофлори та корисної ентомофауни, а також здатністю підвищувати адаптивний потенціал рослин до стресових чинників середовища.

Вміст сухих речовин, цукрів і органічних кислот у плодах є важливими показниками, що відображають рівень інтенсивності фотосинтезу, ефективність асиміляції поживних речовин і спрямованість обмінних процесів у рослинах.

Підвищення концентрації сухих речовин і цукрів, поряд зі зменшенням кислотності, сприяє поліпшенню смакових якостей продукції, підвищенню її енергетичної та харчової цінності, а також конкурентоспроможності на ринку екологічно безпечних продуктів харчування.

На рисунку 3.5 наведено дані про вміст сухих речовин у плодах томатів залежно від норм внесення біопрепарату, %.

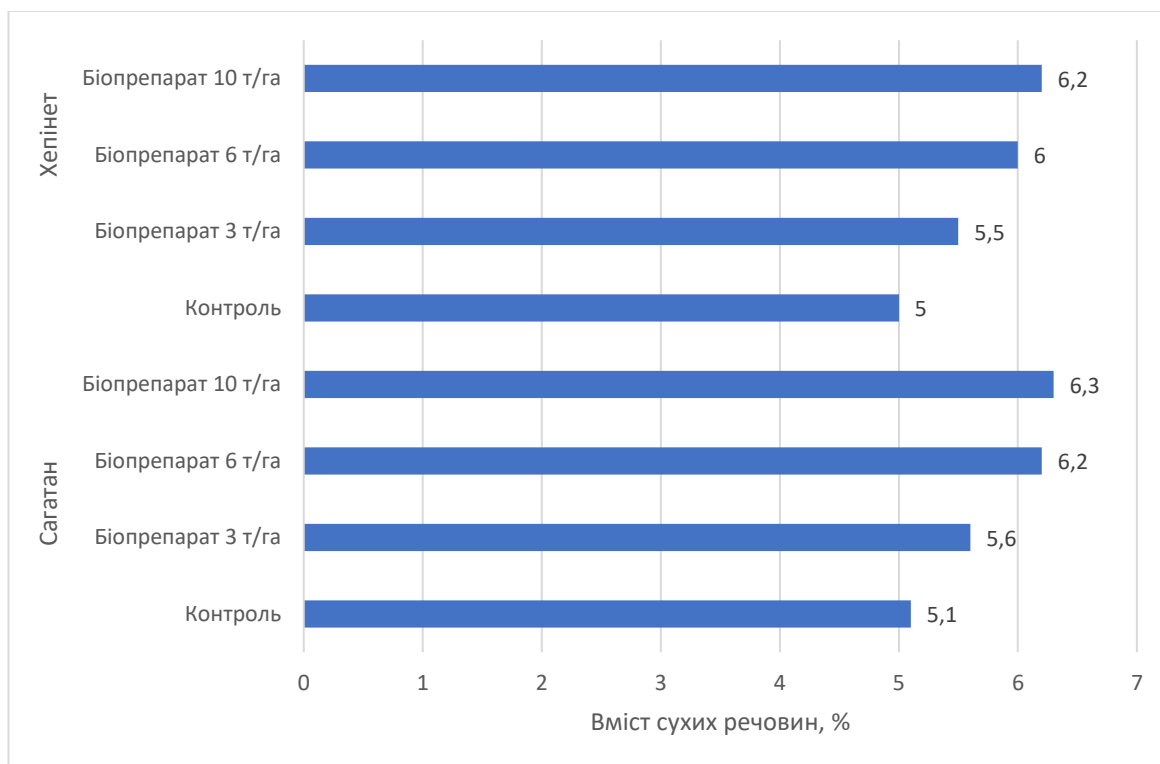


Рисунок 3.5 - Вміст сухих речовин у плодах томатів залежно від норм внесення біопрепарату, %

Дані свідчать про чітко виражену тенденцію до підвищення вмісту сухих речовин у плодах томатів за умов застосування біопрепарату в обох досліджуваних гібридів. У гібриду Сагатан у контрольному варіанті вміст сухих речовин становив 5,1 %, тоді як при внесенні біопрепарату в дозі 3 т/га цей показник зростав до 5,6 %. Подальше підвищення норми до 6 т/га забезпечувало збільшення вмісту сухих речовин до 6,2 %, а при максимальній дозі 10 т/га він досягав 6,3 %. Отримані результати свідчать про посилення процесів накопичення пластичних речовин у плодах під впливом біопрепарату.

Аналогічна закономірність простежувалася і у гібриду Хепінет. У контрольному варіанті вміст сухих речовин становив 5,0 %, тоді як внесення біопрепарату у дозі 3 т/га сприяло його підвищенню до 5,5 %. За норми 6 т/га показник зростав до 6,0 %, а за 10 т/га — до 6,2 %. Таким чином, приріст вмісту сухих речовин у плодах становив у середньому 1,0–1,2 % порівняно з контролем.

Загалом застосування біопрепарату позитивно впливало на якісні показники плодів томатів, зокрема на накопичення сухих речовин, що має важливе значення для підвищення харчової цінності та технологічних властивостей продукції. Найбільш виражений ефект спостерігався за норми внесення 6–10 т/га, тоді як подальше збільшення дози супроводжувалося лише незначним зростанням показника, що вказує на наближення до оптимального рівня біологічної дії препарату.

На рисунку 3.6 наведено дані вміст сухих речовин у плодах капусти залежно від норм внесення біопрепарату, %

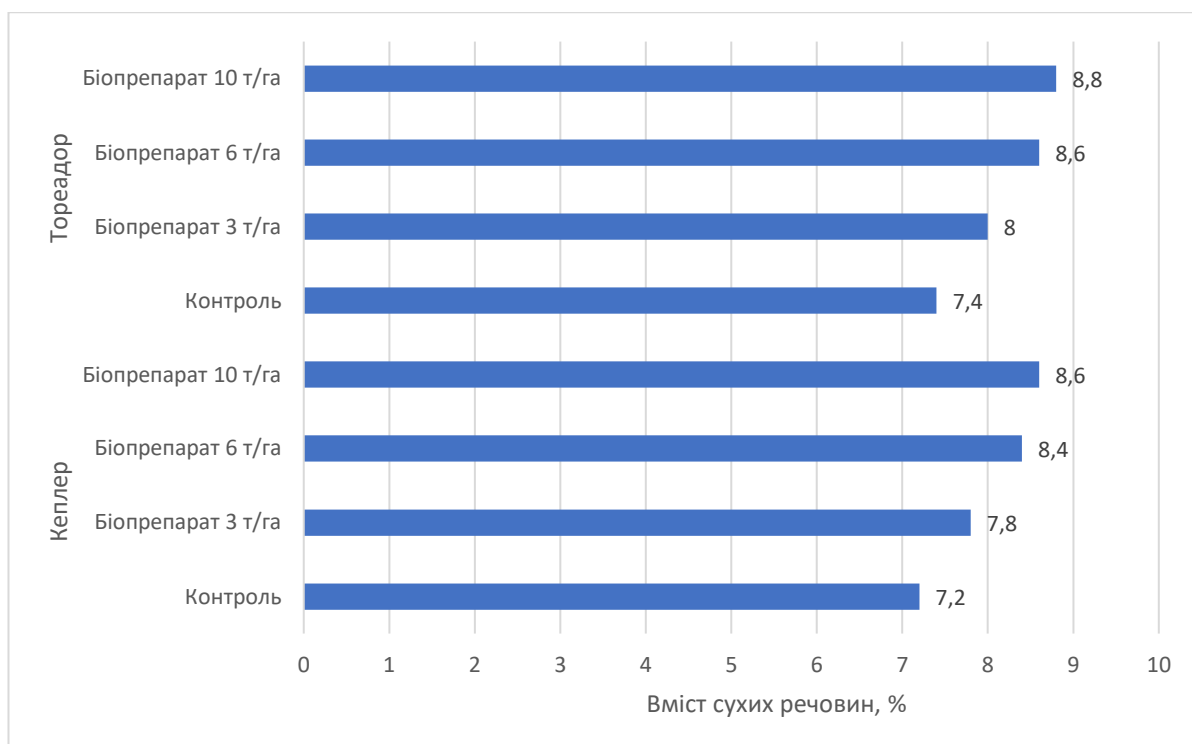


Рисунок 3.6 – Вміст сухих речовин у плодах капусти залежно від норм внесення біопрепарату

Одержані дані свідчать про чітку тенденцію до зростання вмісту сухих речовин у качанах капусти під впливом біопрепарату в обох досліджуваних

гібридів. У гібриду Кеплер у контрольному варіанті вміст сухих речовин становив 7,2 %, тоді як застосування біопрепарату сприяло його послідовному підвищенню: до 7,8 % при нормі 3 т/га, до 8,4 % — при 6 т/га та до 8,6 % — при 10 т/га. Загальний приріст порівняно з контролем досягав 1,4 процентного пункта.

Аналогічна закономірність спостерігалася і у гібриду Тореадор, де в контрольному варіанті вміст сухих речовин становив 7,4 %. За внесення біопрепарату в дозі 3 т/га цей показник зростав до 8,0 %, при 6 т/га — до 8,6 %, а при 10 т/га — до 8,8 %. Максимальний приріст відносно контролю становив 1,4 процентного пункта.

Загалом отримані результати підтверджують, що застосування біопрепарату позитивно впливає на біохімічний склад качанів капусти, сприяючи накопиченню сухої речовини, що є важливим показником якості продукції, її поживної цінності та придатності до зберігання.

У таблиці 3.9 наведено дані про вплив біопрепарату на вміст цукрів у плодах культур.

Таблиця 3.9 - Вплив біопрепарату на вміст цукрів у плодах культур, %.

Варіант досліджу	Культура	Гібрид	Вміст цукрів, %
Контроль	Томат	Сагатам	3,8
Біопрепарат 3 т/га			4,2
Біопрепарат 6 т/га			4,7
Біопрепарат 10 т/га			4,9
Контроль		Хепінет	3,9
Біопрепарат 3 т/га			4,3
Біопрепарат 6 т/га			4,8
Біопрепарат 10 т/га			5,0
Контроль	Капуста	Кеплер	4,6
Біопрепарат 3 т/га			5,0
Біопрепарат 6 т/га			5,6
Біопрепарат 10 т/га			5,8

Контроль			4,7
Біопрепарат 3 т/га		Тореадор	5,1
Біопрепарат 6 т/га			5,7
Біопрепарат 10 т/га			5,9

Отримані результати свідчать про чітко виражений позитивний вплив біопрепарату на накопичення цукрів у плодах томатів і капусти. У гібриду томата Сагатам у контрольному варіанті вміст цукрів становив 3,8 %, тоді як застосування біопрепарату сприяло його зростанню до 4,2 % при дозі 3 т/га, 4,7 % при 6 т/га та 4,9 % при 10 т/га. Аналогічна тенденція спостерігалась і у гібриду Хепінет, де вміст цукрів підвищувався з 3,9 % у контролі до 5,0 % за максимальної дози біопрепарату.

У гібридів капусти також відмічено систематичне зростання вмісту цукрів залежно від норми внесення препарату. Так, у гібриду Кеплер показник зростає з 4,6 % у контролі до 5,8 % за дози 10 т/га, а у гібриду Тореадор — з 4,7 % до 5,9 % відповідно. Найбільш інтенсивне накопичення цукрів спостерігалось за норм внесення 6–10 т/га, що вказує на досягнення оптимального рівня біологічної дії препарату.

У таблиці 3.10 наведено дані про вплив біопрепарату на вміст кислот у плодах культур, %.

Таблиця 3.10 – Вплив біопрепарату на вміст кислот у плодах культур, %

Варіант дослідження	Культура	Гібрид	Вміст кислот, %
Контроль	Томат	Сагатам	0,42
Біопрепарат 3 т/га			0,40
Біопрепарат 6 т/га			0,37
Біопрепарат 10 т/га			0,36
Контроль		Хепінет	0,44
Біопрепарат 3 т/га			0,41
Біопрепарат 6 т/га			0,38

Біопрепарат 10 т/га			0,37
Контроль	Капуста	Кеплер	0,31
Біопрепарат 3 т/га			0,29
Біопрепарат 6 т/га			0,27
Біопрепарат 10 т/га			0,26
Контроль		Тореадор	0,32
Біопрепарат 3 т/га			0,30
Біопрепарат 6 т/га			0,28
Біопрепарат 10 т/га			0,27

Одержані результати свідчать про загальну тенденцію до зниження вмісту органічних кислот у плодах томатів і капусти за умов застосування біопрепарату. У гібридів томата найвищий вміст кислот відмічено у контрольних варіантах: 0,42 % у Сагатана та 0,44 % у Хепінета. Внесення біопрепарату сприяло поступовому зменшенню цього показника, і за максимальної дози 10 т/га він знижувався до 0,36–0,37 %, що свідчить про пом'якшення смакових властивостей плодів.

Аналогічна закономірність спостерігалася і у гібридів капусти. У контрольних варіантах вміст кислот становив 0,31 % у Кеплера та 0,32 % у Тореадора, тоді як за внесення біопрепарату в дозі 10 т/га цей показник знижувався відповідно до 0,26–0,27 %. Отже, застосування біопрепарату сприяло формуванню плодів із нижчим рівнем кислотності, що є важливою передумовою покращення смакових якостей і підвищення споживчої цінності продукції.

3.4 Агрохімічні зміни у ґрунті

Зміни у вмісті доступних форм основних елементів живлення, реакції ґрунтового середовища та рівні гумусу відображають глибші процеси

трансформації ґрунтової родючості під впливом біологічно активних речовин. У зв'язку з цим особливий інтерес становить оцінка післядії біопрепарату на поживний режим і фізико-хімічні властивості ґрунту під дослідними культурами.

У таблиці 3.11 наведено дані про середні значення агроекологічних показників родючості ґрунту після завершення дослідів на дослідних ділянках з томатами.

Таблиця 3.11 - Середні значення агроекологічних показників родючості ґрунту після завершення дослідів на дослідних ділянках з томатами

Варіант дослідів	Доступний азот, мг/кг	Доступний фосфор, мг/кг	Обмінний калій, мг/кг
Контроль	68	42	78
Біопрепарат 3 т/га	82	56	95
Біопрепарат 6 т/га	96	68	112
Біопрепарат 10 т/га	108	76	125

У контрольному варіанті, без застосування добрив, вміст доступного азоту становив 68 мг/кг ґрунту, доступного фосфору — 42 мг/кг, обмінного калію — 78 мг/кг. Застосування біопрепарату вже в нормі 3 т/га забезпечило суттєве зростання всіх досліджуваних агрохімічних показників: вміст доступного азоту підвищився до 82 мг/кг, фосфору — до 56 мг/кг, калію — до 95 мг/кг. Це свідчить про активізацію процесів мінералізації органічної речовини та покращення мобілізації поживних елементів у ґрунтовому середовищі під дією органічного компонента добрива.

Подальше підвищення норми внесення біопрепарату до 6 т/га сприяло ще більш інтенсивному збагаченню ґрунту елементами живлення: вміст доступного азоту зріс до 96 мг/кг, фосфору — до 68 мг/кг, а обмінного калію — до 112 мг/кг. Така динаміка вказує на посилення біологічної активності ґрунту, підвищення ролі мікробіологічних процесів у трансформації поживних речовин та зростання їх доступності для кореневої системи томатів.

Найвищі значення агрохімічних показників зафіксовано у варіанті з внесенням біопрепарату в нормі 10 т/га. Вміст доступного азоту досягав 108 мг/кг, доступного фосфору — 76 мг/кг, а обмінного калію — 125 мг/кг, що відповідно перевищувало контрольні значення на 40, 34 та 47 мг/кг. Таке істотне зростання свідчить про високий потенціал біопрепарату як джерела легкодоступних поживних елементів та як фактора стабілізації поживного режиму ґрунту.

З агроекологічної точки зору отримані результати є вкрай важливими, оскільки застосування біопрепарату не лише підвищує рівень забезпеченості ґрунту поживними речовинами, а й сприяє формуванню більш стійкої та екологічно збалансованої агроєкосистеми. На відміну від мінеральних добрив, органічний біопрепарат поступово вивільняє елементи живлення, зменшуючи ризик їх вимивання у ґрунтові води та забруднення навколишнього середовища.

У таблиці 3.12 наведено дані про середні значення агроекологічних показників родючості ґрунту після завершення дослідів на дослідних ділянках з капустою.

Таблиця 3.12 - Середні значення агроекологічних показників родючості ґрунту після завершення дослідів на дослідних ділянках з капустою

Варіант дослідів	Доступний азот, мг/кг	Доступний фосфор), мг/кг	Обмінний калій, мг/кг
Контроль	70	44	82
Біопрепарат 3 т/га	88	58	100
Біопрепарат 6 т/га	102	70	118
Біопрепарат 10 т/га	118	82	135

У ґрунті контрольного варіанта вміст доступного азоту становив 70 мг/кг, доступного фосфору — 44 мг/кг, обмінного калію — 82 мг/кг. Такі показники характеризують середній рівень забезпеченості ґрунту основними елементами мінерального живлення. Внесення біопрепарату в нормі 3 т/га зумовило помітне зростання концентрації всіх трьох елементів: вміст доступного азоту підвищився

до 88 мг/кг, фосфору — до 58 мг/кг, калію — до 100 мг/кг. Це свідчить про активізацію трансформації поживних речовин у ґрунті та підвищення їх доступності для рослин капусти.

Подальше збільшення норми внесення біопрепарату до 6 т/га забезпечило ще більш інтенсивне збагачення ґрунту елементами живлення. Вміст доступного азоту зріс до 102 мг/кг, доступного фосфору — до 70 мг/кг, а обмінного калію — до 118 мг/кг. Така тенденція вказує на стабільний позитивний вплив біопрепарату на поживний режим ґрунту та посилення ролі біологічних процесів у підтриманні його родючості.

Найвищі значення агроекологічних показників зафіксовані за внесення біопрепарату в дозі 10 т/га. У цьому варіанті вміст доступного азоту досяг 118 мг/кг, фосфору — 82 мг/кг, а обмінного калію — 135 мг/кг, що значно перевищує контрольні значення. Приріст вмісту елементів живлення порівняно з контролем становив відповідно 48 мг/кг за азотом, 38 мг/кг за фосфором та 53 мг/кг за калієм, що є переконливим свідченням високої агрохімічної ефективності застосованого біопрепарату.

З агроекологічної точки зору, покращення забезпеченості ґрунту поживними елементами за умов застосування біопрепарату має важливе значення для підвищення сталості агроecosystem. Органічна природа добрива сприяє поступовому вивільненню поживних речовин, зменшенню втрат азоту та калію внаслідок вимивання, а також обмежує ризики забруднення ґрунтових і поверхневих вод. Це створює передумови для екологічно безпечного виробництва капусти та збереження ґрунтової родючості в довгостроковій перспективі.

У таблиці 3.14 наведено дані про показники кислотності та вмісту гумусу в орному шарі ґрунту під дослідними культурами

Таблиця 3.14 - Показники кислотності та вмісту гумусу в орному шарі ґрунту під дослідними культурами

Культура	Гібрид	Варіант удобрення	pH ґрунту	Вміст гумусу, %
Томат	Сагатан	Контроль	5,9	3,01
		Біопрепарат 3 т/га	6,2	3,13
		Біопрепарат 6 т/ га	6,4	3,18
		Біопрепарат 10 т/ га	6,6	3,24
	Хепінет	Контроль	5,8	3,03
		Біопрепарат 3 т/ га	6,1	3,15
		Біопрепарат 6 т/ га	6,3	3,20
		Біопрепарат 10 т/ га	6,5	3,26
Капуста	Кеплер	Контроль	6,0	3,04
		Біопрепарат 3 т/ га	6,3	3,17
		Біопрепарат 6 т/ га	6,5	3,22
		Біопрепарат 10 т/ га	6,7	3,29
	Тореадор	Контроль	6,1	3,06
		Біопрепарат 3 т/ га	6,4	3,19
		Біопрепарат 6 т/ га	6,6	3,24
		Біопрепарат 10 т/ га	6,8	3,31

Для обох гібридів томатів відмічено чітку тенденцію до зниження кислотності ґрунту (підвищення pH) у міру зростання норми внесення біопрепарату. Так, у гібриду Сагатан у контрольному варіанті pH ґрунту становив 5,9, що відповідає слабкокислій реакції. За внесення біопрепарату в дозі 3 т/га показник підвищувався до 6,2, при 6 т/га — до 6,4, а при 10 т/га — до 6,6, що свідчить про поступове наближення реакції ґрунтового середовища до нейтральної. Аналогічна закономірність спостерігалася і у гібриду Хепінет: pH зростав з 5,8 у контролі до 6,5 за максимальної дози біопрепарату. Такі зміни є

позитивними для томатів, оскільки нейтралізація надмірної кислотності сприяє кращому засвоєнню елементів живлення та активізації ґрунтової мікрофлори.

Подібна тенденція характерна і для ділянок, зайнятих капостою. У гібриду Кеплер рН ґрунту у контрольному варіанті становив 6,0, тоді як за внесення біопрепарату в дозі 10 т/га він підвищувався до 6,7. У гібриду Тореадор показник кислотності змінювався від 6,1 у контролі до 6,8 за максимальної норми внесення. Отже, застосування біопрепарату забезпечувало стабільне зрушення реакції ґрунту в бік слабкокислої–близької до нейтральної, що є оптимальним для більшості овочевих культур.

Не менш важливими є зміни у вмісті гумусу. Для томатів у гібриду Сагатам вміст гумусу у контрольному варіанті становив 3,01 %, тоді як при внесенні біопрепарату він послідовно підвищувався до 3,13 %, 3,18 % і 3,24 % відповідно до доз 3, 6 і 10 т/га. У гібриду Хепінет аналогічно зафіксовано зростання вмісту гумусу з 3,03 % у контролі до 3,26 % за максимальної дози біопрепарату. Таким чином, приріст гумусу під томатами становив у середньому 0,21–0,23 %, що є суттєвим показником для одного вегетаційного сезону.

Під капостою також відмічено помітне гумусонакопичення. У гібриду Кеплер вміст гумусу зростав з 3,04 % у контролі до 3,29 % при нормі 10 т/га, а у гібриду Тореадор — з 3,06 % до 3,31 % відповідно. Збільшення вмісту гумусу на 0,23–0,25 % свідчить про активізацію процесів гуміфікації органічної речовини, що надходила до ґрунту разом із біопрепаратом.

У процесі вивчення ефективності продуктів біоконверсії важливо оцінювати не лише агрохімічні показники ґрунту, а й стан його мікробіологічної активності, оскільки саме ґрунтові мікроорганізми забезпечують перетворення та мобілізацію основних елементів живлення. Біопрепарати, отримані в результаті переробки місцевих органічних відходів, зокрема пташиного пір'я та пташиного посліду, можуть істотно впливати на структуру й активність мікробних угруповань, посилюючи природні процеси трансформації азоту, фосфору та органічної речовини. Тому оцінка чисельності основних еколого-трофічних груп мікроорганізмів є важливою складовою дослідження, що

дозволяє встановити, яким чином внесення біоконверсійного продукту впливає на біологічну продуктивність ґрунту.

У таблиці 3.15 наведено дані про чисельність мікроорганізмів різних еколого-трофічних і таксономічних груп у ґрунті за дії біопрепарату, млн КУО/г ґрунту.

Таблиця 3.15 - Чисельність мікроорганізмів різних еколого-трофічних і таксономічних груп у ґрунті за дії біопрепарату, млн КУО/г ґрунту

Мікроорганізми	Контроль	Біопрепарат (3 т/га)	Біопрепарат (6 т/га)	Біопрепарат (10 т/га)
Амоніфікатори	2090,3 ± 16,5	2310,4± 18,2	2585,7 ± 21,4	2748,9 ± 26,1
Бактерії, що використовують мінеральні форми азоту	13,1 ± 1,3	14,8 ± 1,6	19,7 ± 2,3	22,1 ± 2,7
Нітрифікатори	10,7 ± 0,7	11,9 ± 0,8	14,6 ± 1,1	17,3 ± 1,5
Азотфіксатори	1,08±0,10	1,21 ± 0,12	1,34 ± 0,11	1,48 ± 0,13
Олігонітрофіли	13,6 ± 1,9	15,2 ± 2,1	18,9 ± 2,7	20,6 ± 3,1
Стрептоміцети	49,6 ± 3,9	54,7 ± 4,3	59,8 ± 4,9	66,9 ± 5,4
Мікроміцети	13,1 ± 3,5	14,6 ± 3,9	17,2 ± 4,6	19,8 ± 5,0
Фосфатмобілізатори	0,56±0,02	0,62 ± 0,02	0,71 ± 0,03	0,83 ± 0,04
Спорові форми	0,010	0,012	0,013	0,014

Загальна тенденція свідчить, що внесення біопрепарату сприяє активізації мікробіоти: у більшості груп спостерігається поступове зростання чисельності порівняно з контролем, а максимальні значення зафіксовані за дози 10 т/га.

Найбільш виражене підвищення відмічено серед амоніфікаторів, кількість яких зростає з 2090,3 млн КУО/г у контролі до 2748,9 млн КУО/г. Це вказує на посилення процесів мінералізації органічних речовин, що особливо важливо при застосуванні продуктів біоконверсії, отриманих із білковмісної сировини, зокрема пташиного пір'я. Аналогічну позитивну реакцію

продемонстрували бактерії, що використовують мінеральні форми азоту, та нітрифікатори — їхня чисельність збільшувалася відповідно до зростання дози біопрепарату, що свідчить про активізацію азотного циклу в ґрунті.

Азотфіксуючі мікроорганізми також реагували на внесення препарату підвищенням чисельності, що вказує на покращення умов для біологічної фіксації азоту. Позитивні зміни відмічені й серед олігонітрофілів, мікроміцетів та стрептоміцетів, які беруть участь у розкладанні складних органічних сполук. Особливо важливою є динаміка фосфатмобілізаторів: їх кількість зросла з 0,56 до 0,83 млн КУО/г, що підкреслює здатність біопрепарату покращувати мобілізацію фосфору — одного з найдефіцитніших елементів у ґрунтових системах. Невелике, але стабільне зростання чисельності спорових форм свідчить про загальне підвищення стійкості та різноманіття ґрунтової мікробіоти.

4 ОХОРОНА ПРАЦІ

4.1 Загальні вимоги охорони праці

Загальні вимоги з охорони праці на підприємствах аграрного виробництва охоплюють систему організаційних, технічних, санітарно-гігієнічних і управлінських заходів, спрямованих на створення безпечних умов праці та збереження здоров'я працівників. Особлива увага приділяється роботі з органічними відходами, такими як пташине пір'я, послід та інші біоматеріали, які потенційно можуть містити мікроорганізми, алергени та пил, що негативно впливає на дихальні шляхи, шкіру та загальний стан здоров'я працівників.

Відповідно до положень національних стандартів ДСТУ ISO 45001:2018 та ДСТУ 1912-93 «Системи управління охороною праці. Загальні положення», на суб'єкта господарювання покладається відповідальність за формування, впровадження та підтримання ефективно функціонуючої системи управління охороною праці. Така система передбачає розроблення та актуалізацію внутрішньої нормативно-правової документації, регламентів, інструктивних матеріалів і процедур внутрішнього моніторингу, а також організацію процесів навчання, перевірки знань і атестації працівників. До початку виконання виробничих обов'язків персонал зобов'язаний пройти первинний інструктаж з питань охорони праці, що включає комплексне ознайомлення з ідентифікованими небезпечними та шкідливими виробничими факторами, заходами щодо їх попередження й мінімізації, правилами безпечної експлуатації технічного обладнання та порядком застосування засобів індивідуального захисту. Проведення повторних і позапланових інструктажів здійснюється у відповідності до вимог ДСТУ 2778-94 «Інструктажі з охорони праці. Загальні

положення» з метою забезпечення стабільного рівня виробничої безпеки та профілактики виробничого травматизму[57].

Просторово-функціональна організація робочої зони має відповідати принципам ергономіки та санітарних норм. Повинні бути передбачені спеціальні зони для зберігання органічних відходів, окремі місця для підготовки добрив та зонування приміщень, щоб уникнути контакту персоналу з необробленими матеріалами. Всі приміщення, де відбувається переробка пір'я та інших органічних матеріалів, повинні бути обладнані вентиляційними системами, що забезпечують ефективне видалення пилу та мікробіологічних агентів. З метою зниження негативного впливу шкідливих і небезпечних виробничих чинників на організм персоналу передбачається обов'язкове використання засобів індивідуального захисту, зокрема фільтрувальних засобів захисту органів дихання, захисних окулярів, рукавичок, спеціального захисного одягу та взуття.

Підвищений акцент робиться на суворому дотриманні санітарно-гігієнічних вимог персоналом, задіяним у процесах роботи з органічними відходами. Працівники зобов'язані мити руки після закінчення роботи, не торкатися обличчя під час роботи з матеріалами, уникати прямого контакту з пилом та мікроорганізмами, а також проходити регулярні медичні огляди відповідно до ДСТУ 7035-95 «Медичні огляди працівників». Профілактика професійних захворювань включає контроль стану здоров'я, своєчасне виявлення алергічних реакцій та інших симптомів впливу шкідливих факторів, а також впровадження профілактичних заходів у робочому середовищі [58].

Адміністративно-управлінський персонал підприємства відповідає за здійснення постійного моніторингу дотримання встановлених загальних вимог у сфері охорони праці. Зазначена контрольна-наглядова діяльність охоплює аналіз технічного й санітарно-гігієнічного стану робочих зон, перевірку укомплектованості та функціональної придатності засобів індивідуального захисту, оцінювання рівня дотримання персоналом вимог безпеки праці, а також організацію та проведення регламентованих інструктажів. Систематичне здійснення моніторингу виробничого середовища забезпечує можливість

своєчасної ідентифікації потенційно небезпечних факторів, реалізації превентивних та коригувальних заходів і підвищення результативності функціонування системи управління охороною праці на підприємстві.

Дотримання загальних вимог охорони праці не лише гарантує належний рівень безпеки персоналу, а й підвищує продуктивність праці, зменшує ймовірність втрат матеріалів та покращує якість продукції. У сфері агровиробництва це особливо важливо, оскільки використання органічних добрив з переробленого пташиного пір'я потребує суворого контролю технологічного процесу та санітарних норм. Створення безпечних умов праці сприяє розвитку корпоративної культури безпеки на підприємстві, підвищенню дисциплінованості персоналу та мінімізації ризику виникнення аварійних ситуацій під час роботи з біологічними відходами та технологічним обладнанням для їх переробки.

Комплексні положення з охорони праці є ключовим елементом у забезпеченні безпечного та ефективного виробничого процесу, з акцентом на безпечне виконання операцій із органічними субстратами, що мають потенційну небезпеку для здоров'я працівників. Виконання цих заходів забезпечує комплексний підхід до охорони праці, сприяє збереженню здоров'я персоналу та підвищенню екологічної безпеки продукції [59].

4.2 Безпека при використанні обладнання та технічних засобів

Невиконання вимог безпеки під час використання технологічного обладнання подрібнення, транспортування та переробки органічних матеріалів може спричиняти ушкодження здоров'я працівників, виникнення аварійних ситуацій та забруднення робочої зони.

Відповідно до національних стандартів безпеки машин, кожен технічний засіб повинен експлуатуватися відповідно до інструкцій виробника та

внутрішніх нормативних документів підприємства. Обладнання, яке використовується для подрібнення пір'я, сортування та підготовки до біоконверсії, має бути оснащено запобіжними кожухами, аварійними вимикачами та сигналізаційними системами, що попереджають працівників про можливу небезпеку [60].

Працівники, які експлуатують технічні засоби, повинні проходити спеціальну освітньо-інструктивну роботу стосовно безпечного поводження з обладнанням. Перед початком роботи здійснюється перевірка технічного стану машин, справності електропроводки, гідравлічних та пневматичних систем, а також наявності захисних пристроїв. У разі виявлення несправностей або пошкоджень робота з обладнанням забороняється до усунення дефектів.

Особливу увагу приділяють безпеці під час експлуатації транспортних засобів та піднімальними механізмами, що використовуються для перевезення органічних відходів в межах об'єкта підприємства. Працівники зобов'язані суворо дотримуватися нормативних правил завантаження та розвантаження, уникати перевантаження механізмів і застосовувати засоби індивідуального захисту, зокрема рукавички, спеціальне взуття та захисні каски. Всі дії з переміщенням матеріалів мають проводитися відповідно до ДСТУ 2990-94 «Транспортні засоби та механізми. Загальні вимоги безпеки» та внутрішньопідприємницьких норм і положень [61].

Робота з обладнанням для біоконверсії органічних відходів потребує також дотримання санітарно-гігієнічних норм. Пил, що утворюється під час подрібнення пір'я, може містити алергени та мікроорганізми, тому робочі приміщення повинні бути обладнані ефективною витяжною вентиляцією, а персонал — респіраторами або масками. Крім того, передбачені регулярні дезінфекційні та очищувальні заходи обладнання згідно з національними стандартами та внутрішніми санітарними положеннями підприємства.

Моніторинг дотримання норм безпеки під час експлуатації обладнання здійснюється керівником відповідного підрозділу та службою охорони праці. Перевірка включає оцінку технічного стану машин, наявність засобів аварійної

зупинки, справність сигналізацій та наявність інструкцій з експлуатації в межах робочої зони. Систематичні планові та позапланові перевірки дозволяють виявляти потенційні ризики, запобігати аварійним ситуаціям і забезпечувати безпечне функціонування обладнання на всіх етапах переробки органічних відходів.

Дотримання вимог безпеки при використанні обладнання не лише забезпечує охорону здоров'я працівників, а й зумовлює підвищення продуктивності виробництва, зменшення матеріальних втрат та покращення якості кінцевої продукції. Таким чином, безпечна експлуатація технічних засобів є обов'язковим елементом системи управління охороною праці на підприємстві, що здійснює переробку органічних відходів [62].

4.3 Заходи з профілактики впливу шкідливих факторів

Робота з органічними відходами птахівництва, зокрема пташиним пір'ям та послідом, супроводжується впливом різноманітних шкідливих факторів, які здатні чинити шкідливий вплив на здоров'я персоналу та знижувати продуктивність. До основних шкідливих факторів відносяться фізичні, хімічні, біологічні та психологічні. Фізичні фактори включають шум від роботи механізованого обладнання, вібрацію, підвищену температуру та інтенсивне освітлення. Хімічні фактори проявляються у вигляді аміаку, летких органічних сполук та пилу, що утворюється при подрібненні та транспортуванні пір'я. Біологічні фактори представлені мікроорганізмами, грибками та алергенами, здатними спричиняти професійні захворювання дихальної системи та шкірних покривів та алергічні реакції. Психологічні фактори включають високий рівень концентрації уваги, монотонність трудового процесу та потенційна ймовірність виникнення стресових факторів під час виконання виробничих операцій [63].

Для мінімізації впливу зазначених факторів застосовується комплекс заходів профілактики, який охоплює організаційні, технічні, санітарно-гігієнічні та медичні методи. Організаційні заходи включають правильну організацію робочих місць, регламентацію тривалості робочого дня, чергування працівників у процесі обробки органічних відходів, проведення систематичних інструктажів та навчання персоналу щодо правил безпечного поводження з матеріалом. Важливим аспектом є також розробка внутрішньої нормативної документації, що визначає порядок виконання робіт, заходи з охорони праці та алгоритми реагування на надзвичайні ситуації, у відповідності до національних стандартів з управління охороною праці [64].

Технічні заходи профілактики включають застосування обладнання з підвищеним рівнем виробничої безпеки, оснащеного аварійними вимикачами, запобіжними кожухами та сигналізаціями. Приміщення для переробки органічних відходів повинні бути обладнані ефективними вентиляційними системами та витяжними установками, що забезпечують видалення пилу, мікробіологічних агентів та летких сполук. Для зменшення прямого контакту працівників з матеріалом широко використовуються автоматизовані та напівавтоматизовані лінії обробки, які дозволяють скоротити ризики травматизму та впливу шкідливих факторів.

Санітарно-гігієнічні заходи передбачають обов'язкове використання засобів індивідуального захисту: респіраторів, масок із фільтрацією, рукавичок, спеціального захисного одягу та робочого взуття, що відповідають вимогам. Працівники зобов'язані дотримуватися норм і процедур особистої гігієни, зокрема миття рук після завершення робочого процесу та уникання дотику до обличчя під час виконання робіт, обробка робочого одягу та спецвзуття дезінфікуючими засобами. Регулярне очищення та дезінфекція обладнання запобігає накопиченню пилу та мікроорганізмів у виробничих приміщеннях, знижуючи ризик інфекційних та алергічних захворювань.

Медичні заходи профілактики включають систематичні медичні обстеження персоналу відповідно до ДСТУ 7035-95 «Медичні огляди

працівників», контроль стану здоров'я та своєчасне виявлення симптомів професійних захворювань. Важливо забезпечити раннє виявлення алергічних реакцій, респіраторних розладів, шкірних запалень та інших негативних проявів впливу шкідливих факторів. Психофізіологічна підтримка працівників також є важливим аспектом профілактики: організація перерв, правильне чергування робіт, контроль тривалості робочого дня та попередження перевтоми знижують ризик стресових ситуацій.

Моніторинг дотримання профілактичних заходів здійснюється відділом охорони праці та керівниками відповідних структурних підрозділів. Регулярний моніторинг включає оцінку рівня шуму, концентрації пилу, шкідливих газів та мікроорганізмів у робочих приміщеннях, перевірку стану вентиляційних систем, справності засобів індивідуального захисту та результатів медичних оглядів. Систематичний контроль дозволяє оперативно виявляти потенційні ризики, розробляти заходи щодо їх усунення та підтримувати безпечний рівень умов праці.

Комплексне застосування організаційних, технічних, санітарно-гігієнічних та медичних заходів забезпечує ефективну профілактику шкідливих факторів, що виникають при роботі під час роботи з біологічними відходами птахівництва. Виконання цих заходів сприяє захисту здоров'я персоналу та оптимізації продуктивності праці, зменшенню ризику аварійних ситуацій та покращенню якості кінцевої продукції, зокрема органічних добрив і біостимуляторів, що виробляються на підприємстві [65].

4.4 Безпека при агротехнічних роботах

Агротехнічні роботи, що виконуються у галузі сільськогосподарського виробництва, включають підготовку ґрунту, внесення добрив, посів, садіння, обробку рослин, полив, збор урожаю та догляд за культурами. Вони

характеризуються інтенсивним фізичним навантаженням, використанням механізованого та ручного обладнання, контактами з органічними матеріалами та хімічними речовинами. З метою гарантування безпечних умов праці персоналу під час виконання агротехнічних операцій застосовуються комплексні заходи охорони праці, організаційного, технічного та санітарно-гігієнічного характеру.

Основними небезпеками при агротехнічних роботах є травми через необережне поводження з інструментами, обладнанням та транспортними засобами, вплив пилу та мікробіологічних агентів з органічних добрив, контакт зі шкідливими речовинами, а також фізична перевтома. Особливої уваги потребує робота з органічними добривами з переробленого пташиного пір'я, оскільки цей матеріал містить білки, амінокислоти та мікроорганізми, здатні викликати алергічні та подразнювальні реакції [66].

Організаційні заходи безпеки передбачають ретельне планування агротехнічних робіт, визначення послідовності операцій, регламентацію робочого часу та чергування працівників для зменшення фізичного навантаження. Працівники обов'язково проходять інструктажі щодо правил поводження з добривами, застосування обладнання та засобів індивідуального захисту відповідно до національних стандартів та міжнародних норм з охорони праці.

Технічні заходи включають використання безпечного обладнання для внесення органічних добрив, таких як розкидачі, шланги для поливу, механізми для внесення компосту або вермигумусу, а також спеціальні лопати, граблі та інструменти з ізольованими ручками. Усі механізми повинні бути справними, оснащені запобіжними пристроями та сигналізаціями, а їх використання — відповідати інструкціям виробника.

Санітарно-гігієнічні заходи передбачають застосування засобів індивідуального захисту: рукавичок, респіраторів, масок, спецодягу та спеціального взуття. Після завершення робіт необхідно проводити миття рук, обробку обличчя та зміну робочого одягу. Це дозволяє знизити ризик

потрапляння пилу, мікроорганізмів та алергенів на шкірні покриви та слизові тканини. Для персоналу, що працює із добривами, рекомендується регулярна обробка інструментів та обладнання дезінфекційними засобами, а також контроль стану ґрунту та води для запобігання забруднень.

Особливе значення має правильна організація робочих зон і проходів між культурами для запобігання травмуванню, падінь та ударів. У місцях застосування техніки та механізованих пристроїв встановлюються попереджувальні знаки та інструкції щодо безпечного пересування персоналу. Для важких або монотонних робіт передбачені перерви та чергування робітників, що зменшує ризик перевтоми та помилок.

Моніторинг виконання вимог безпеки під час проведення агротехнічних операцій здійснює керівник підрозділу та служба охорони праці. Регулярно перевіряється стан обладнання, наявність засобів індивідуального захисту, а також дотримання працівниками правил безпечного поводження з добривами та інструментами. Моніторинг умов праці дозволяє своєчасно виявляти потенційні ризики, коригувати технологічні процеси та підвищувати ефективність і безпеку виробництва.

Таким чином, застосування комплексних заходів безпеки під час агротехнічних робіт забезпечує збереження здоров'я працівників, зниження травматизму, поліпшення якості обробки культур та підвищення ефективності використання органічних добрив, включаючи пташине пір'я, у сільськогосподарському виробництві [67].

ВИСНОВКИ

Місцеві органічні відходи, зокрема пташине перо, є перспективним ресурсом для отримання цінних органічних фертилізаторів шляхом біоконверсії. Пір'я, яке за природних умов розкладається вкрай повільно та майже не залучається до природних біогеохімічних циклів, може бути ефективно перероблене завдяки дії мікроорганізмів, здатних руйнувати кератин і переводити зв'язані форми азоту, сірки, амінокислот і фосфору в доступний для рослин стан. Проведені дослідження, підтвердили, що застосування біоконверсійного продукту позитивно впливає на агрохімічні та біологічні властивості ґрунту: відмічено зростання чисельності основних еколого-трофічних груп мікроорганізмів, активізацію процесів амоніфікації, нітрифікації та мобілізації фосфору. Культури томату й капусти, вирощені за використання такого біодобрива, демонстрували інтенсивніший ріст, кращий розвиток і підвищену врожайність, що свідчить про високий потенціал у сільськогосподарському використанні у ґрунтово-кліматичних умовах регіону.

Отримані результати мають важливе екологічне значення, оскільки доводять, що біоконверсія дозволяє максимально раціонально утилізувати складнорозкладні органічні матеріали без утворення надлишкових відходів і без створення негативного екологічного навантаження. Така технологія зменшує антропогенне навантаження на екосистеми Черкаської області, сприяє розвитку низьковуглецевого сільського господарства та забезпечує замкнений цикл використання органічних ресурсів: відходи не накопичуються, а перетворюються на цінний агрономічний продукт. Це дає можливість зменшити потребу в мінеральних добривах, зберігати родючість ґрунтів та підтримувати екологічну стабільність агроландшафтів.

З огляду на отримані результати рекомендується ширше впроваджувати технології біоконверсії пір'я в аграрних підприємствах Черкаської області, оскільки вони забезпечують покращення біологічної активності ґрунту та підвищення ефективності живлення рослин. Доцільно оптимізувати дози внесення біоконверсійного добрива, оскільки підвищені дози показали найбільш виражений ефект. Рекомендується також продовжувати дослідження щодо поєднання таких добрив із сучасними методами фертигації з метою раціонального використання водних і поживних ресурсів. Біоконверсійні продукти мають розглядатися як важливий елемент екологічно орієнтованого землеробства регіону, що сприяє отриманню стабільних урожаїв, водночас мінімізуючи вплив агровиробництва на екологічне середовище з одночасним забезпеченням принципів сталого розвитку Черкаської області.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Андреюк К. І. Функціонування мікробних ценозів ґрунту в умовах антропогенного навантаження / К. І.Андреюк, Г.О.Іутинська, А.Ф. Антипчук// К.: Обереги, 2001. – 240 с.
2. Афендулов К. П. Основи системи удобрення сільськогоспо-дарських культур у сівозміні / К. П. Афендулов// К.: Урожай, 1971. – 33 с.
3. Бикін А. В. Вермикомпост та його цінність / А. В. Бикін, М. М. Городній // Натураліс. – 1996. – № 2. – С.11–12.
4. Бикін А.В. Нові орієнтири технологічного забезпечення вирощування овочевих культур /А. В. Бикін, П.Томсон// Натураліс. – 1997. – №1–2. – С. 17–20.
5. Agrahari, S., & Wadhwa, N. (2012). Isolation and characterization of feather degrading enzymes from *Bacillus megaterium* SN1 isolated from Ghazipur poultry waste site. *Applied Biochemistry and Microbiology*, 48, 175–181.
6. Anitha, T. S., & Palanivelu, P. (2013). Purification and characterization of an extracellular keratinolytic protease from a new isolate of *Aspergillus parasiticus*. *Protein Expression and Purification*, 88, 214–220.
7. Bach, E., Daroit, D. J., Correa, A. P. F., & Brandelli, A. (2011). Production and properties of keratinolytic proteases from three novel Gram-negative feather-degrading bacteria isolated from Brazilian soils. *Biodegradation*, 22, 1191–1201.
8. Balaji, S., Kumar, M. S., Karthikeyan, R., Kumar, R., Kirubanandan, S., Sridhar, R., et al. (2008). Purification and characterization of an extracellular keratinase from a hornmeal-degrading *Bacillus subtilis* MTCC (9102). *World Journal of Microbiology and Biotechnology*, 24, 2741–2745.

9. Bálint, B., Bagi, Z., Tóth, A., Rákhely, G., Perei, K., & Kovács, K. L. (2005). Utilization of keratin-containing biowaste to produce biohydrogen. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 69, 404–410.
10. Dalev, P., Ivanov, I., & Liubomirova, A. (1997). Enzymic modification of feather keratin hydrolysates with lysine aimed at increasing the biological value. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 73, 242–244.
11. Kirkpinar, F., Açıkgöz, Z., Buzkurt, M., & Ayhan, V. (2004). Effects of inclusion of poultry by-product meal and enzyme-prebiotic supplementation in grower diets on performance and feed digestibility of broilers. *British Poultry Science*, 45, 273–279.
12. Антонєць С.С., Писарєнко В.М., Опара М.М. Регіональний аспект біологізації землеробства: напрями досліджень, здобутки і перспективи. Вісник Полтавського державного сільськогосподарського інституту. 2001. № 4. С. 15-19.
13. Барановський В.А. Екологічний стан України. Київ: Географіка, 2000. 41 с
14. Біостимулятори (регулятори росту) рослин. Київ: МНТЦ Агробіотех НАН України і МОН України, 2013–2014. 29 с.
15. Довідник міжнародних стандартів для органічного виробництва / за ред. Копитька М.В., Копитько О.О. Київ СПД Горобець Г.С. 2017. 356 с.
16. Бондар Є.А. Адаптація «органічної» системи землеробства до природних і соціальних умов України. Вісник Львівського національного аграрного університету: Агрономія. Львів: Львів. нац. аграр. ун-т. 2011. № 15 (2). С. 238–246.
17. Карасик І.М., Теркіял О.М., Господаренко Г.М., Колярський Ю.В. Агрохімія. Київ. Вища школа, 1999. 471с.
18. Наукові основи виробництва органічної продукції в Україні / за ред. Гадзала Я.М., Камінського В.Ф. Київ: Аграрна наука, 2016. 592 с.
19. Наукові основи ефективного розвитку землеробства в агроландшафтах України: Камінський В.Ф., Гадзало Я.М., Моргун Т.Е., Дегодюк Е.Г.,

Дегодюк С.Е., Літвінова О.А та ін. / за ред. Камінського В.Ф. Київ: ВП «Едельвейс», 2015. 428 с.

20. Langeveld, J. P. M., Wang, J. J., Van de Wiel, D. F. M., Shih, G. C., Garssen, G. J., Bossers, A., et al. (2003). Enzymatic degradation of prion protein in brain stem from infected cattle and sheep. *Journal of Infectious Diseases*, 188, 1782–1789
21. Márquez, E., Bracho, M., Archile, A., Rangel, L., & Benítez, B. (2005). Proteins, isoleucine, lysine and methionine content of bovine, porcine and poultry blood and their fractions. *Food Chemistry*, 93, 503–505.
22. Nordestgaard, B. G., & Varbo, A. (2014). Triglycerides and cardiovascular disease. *The Lancet*, 384, 626–635.
23. Rossi, D. M., Flores, S. H., Venzke, J. G., & Ayub, M. A. Z. (2009). Biological evaluation of mechanically deboned chicken meat protein hydrolysate. *Brazilian Journal of Nutrition*, 22, 879–885.
24. Abdalla, K., Sun, Y., Zarebanadkouki, M., Gaiser, T., Seidel, S., et al., 2022. Long-term continuous farmyard manure application increases soil carbon when combined with mineral fertilizers due to lower priming effects. *Geoderma* 428, 116216. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2022.116>
25. Blaise, D., Singh, J.V., Bonde, A.N., Tekale, K.U., Mayee, C.D., 2005. Effects of farmyard manure and fertilizers on yield, fibre quality and nutrient balance of rainfed cotton (*Gossypium hirsutum*). *Bio. Tech.* 96 (3), 345–349. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2004.03.008>.
26. Dhiman, D., Sharma, R., Sankhayan, N.K., Wepehya, S., Sharma, S.K., Kumar, R., 2019a. Effect of regular application of fertilizers, manure, and lime on soil health and productivity of wheat in an acid Alfisol. *J. Plant Nutr.* 42, 2507–252
27. Ferguson, R.B., Nienaber, J.A., Eigenberg, R.A., Woodbury, B.L., 2005. Long-term effects of sustained beef feedlot manure application on soil nutrients, corn silage yield, and nutrient uptake. *J. Environ. Qual.* 34, 1672–1681

- 28.Маковецька Ю. М. Аналіз особливостей утворення та поводження з відходами на сільських територіях. Ефективна економіка. 2015. № 12. URL: <http://www.economy.nayka.com.ua/?op=1&z=4684>.
- 29.Оверковська Т. К. Правові засади поводження із сільськогосподарськими відходами. Екологічне право. 2021. № 2. С. 85–91.
- 30.Корнієнко І. М., Гуляєв В. М., Анацький А. С., Неошивайленко Н. О., Кузнєцова О. О., Ястремська Л. С., Барановський М. М. Європейський досвід біоконверсії рослинних відходів, перспективні ЕМ-технології в Україні (УАДУ). Перспективи виробництва біосировини енергетичних культур на рекультивованих землях: матеріали міжн. наук.-практ. конф. (23–24.06.2022). Дніпро: Дніпровський державний аграрноекономічний університет, 2022. С. 129–132.
- 31.Salminen, E., & Rintala, J. (2002). Anaerobic digestion of organic solid poultry slaughterhouse waste — A review. *Bioresource Technology*, 83, 13–26
- 32.Sams, A. R. (2001). *Poultry meat processing*. Boca Raton: CRC Press. Sen, D., Roy, W., Das, L., Sadhu, S., & Bhattacharjee, C. (2010). Ultrafiltration of macromolecules using rotating disc membrane module (RDMM) equipped with vanes: Effects of turbulence promoter. *Journal of Membrane Science*, 360, 40–47
- 33.Wang, L., Cheng, G., Ren, Y., Dai, Z., Zhao, Z.-S., Liu, F., Li, S., Wei, Y., Xiong, J., Tang, X.- F., 2015. Degradation of intact chicken feathers by *Thermoactinomyces* sp. CDF and characterization of its keratinolytic protease. *Appl. Microbiol. Biotechnol.* 99, 3949–3959. <https://doi.org/10.1007/s00253-014-6207-4>.
- 34.United States Department of Agriculture, 2020. *Livestock and Poultry (2020): World Markets and Trade*. Available online at. https://apps.fas.usda.gov/psdonline/circulars/livestock_poultry.pdf
- 35.Shavandi, A., Silva, T.H., Bekhit, A.A., Bekhit, A.E.D.A., 2017. Keratin: dissolution, extraction and biomedical application. *Biomater. Sci.* 5, 1699–1735

36. Smith, T.A., Steinert, P.M., Parry, D.A.D., 2004. Modeling effects of mutations in coiledcoil structures: case study using epidermolysis bullosa simplex mutations in segment 1a of k5/k14 intermediate filaments. *Proteins* 55, 1043–1052
37. Yohko, Y., Mari, M., Mohamed Mahdi, A., Michel, M., Peter, S., Tsuyoshi, Y., 2014. Flippase (FLP) recombinase-mediated marker recycling in the dermatophyte *Arthroderma vanbreuseghemii*. *Microbiology* 160, 2122–2135
38. H. Xiang, J. Gao, B. Yu, H. Zhou, D. Cai, Y. Zhang, X. Chen, X. Wang, M. Hofreiter, X. Zhao, Early Holocene chicken domestication in northern China, *Proc. Natl. Acad. Sci.* 111 (2014) 17564–17569
39. A.A. Osman y, A. elsayed, A.M. Mowafy, F. M, Bioprocess enhancement of feather degradation using alkaliphilic microbial mixture, *Bri Poult. Sci.* 58 (2017) 319–328
40. Барліт В. Утилізації відходів тваринництва та рослинництва, як енергетична незалежність сільськогосподарських підприємств України. Технічне забезпечення підприємств України. інноваційних технологій в агропромисловому комплексі: матеріали III Міжнар. наук.-практ. конференції молодих учених. Запоріжжя: ТДАТУ, 2023. С. 73-75.
41. Герасименко В.Г., Герасименко М.О., Цвіліховський М.І.. Біотехнологія. К.: Фірма «ІНКОС», 2006. 647с.
42. Корнієнко І.М, Ястремська Л.С., Кузнецова О.О., Барановський М.М., Візер А.К. Біоконверсія органічних відходів — європейський досвід та українські практики. Хімічні та біофармацевтичні технології. Технології та інжиніринг, № 3(8), 2022. С. 37-49. Режим доступу: <https://doi.org/10.30857/2786-5371.2022.3.4>
43. Сендецький В.М. Удосконалення технології виробництва органічного добрива «біогумус» методом вермикультивування. Вісник Прикарпатського національного університету ім. Василя Стефаника. Серія Біологія. Вип. 17, 2012. С. 231-235.

- 44.Бондаренко, І. М. Системи зберігання та первинної переробки органічних відходів птахівництва в аграрному виробництві. *Вісник аграрної інженерії*, 2021, №3, с. 45–52.
- 45.Черненко, О. В. Технологічні майданчики для акумулювання та підготовки біосировини: інженерні рішення та екологічні вимоги. *Екологія і природокористування*, 2020, Т. 28, №1, с. 112–119.
- 46.Ковальчук, Р. С., Гнатюк, В. П. Логістичні аспекти локального збирання та переробки побічної продукції птахівництва. *Наукові праці УкрНДІ аграрної економіки*, 2022, №14, с. 67–74.
- 47.Литвиненко, П. О. Формування побічної продукції птахівництва та сучасні підходи до її утилізації. *Птахівництво України*, 2021, №2, с. 33–39.
- 48.Савчук, І. М., & Крижанівська, Т. О. Біологічні та технологічні аспекти накопичення пташиного пір'я у промислових птахокомплексах. *Агроекологічний журнал*, 2020, Т. 18, №3, с. 58–65.
- 49.Melnyk, V., & Horban, O. Keratin-Based Poultry By-Products: Generation, Composition and Recycling Potentials in Large-Scale Broiler Production. *Journal of Environmental Agro-Processes*, 2022, Vol. 7(1), pp. 41–49.
- 50.Булигін, С. Ю., & Медведєв, В. В. Ґрунти Лісостепу України: властивості, родючість та екологічні аспекти використання. *Агроекологічний журнал*, 2019, №1, с. 14–22.
- 51.Шевченко, Т. П. Природно-кліматичні умови Черкаської області та їхній вплив на продуктивність агроценозів. *Вісник географії та екології*, 2020, Т. 23, №2, с. 57–63.
- 52.Dudka, S., & Yakovenko, V. Soil–climate interactions in the Forest-Steppe zone of Central Ukraine: Impacts on nutrient cycling and organic matter dynamics. *Journal of Environmental Soil Science*, 2021, Vol. 12(3), pp. 101–109.
- 53.Якість ґрунту. Відбір проб : ДСТУ 4115-2002. — Київ : Держспоживстандарт України, 2003. — 14 с.
- 54.Якість ґрунту. Попередня обробка проб для фізико-хімічного аналізу : ДСТУ ISO 11464:2001. — Київ : Держстандарт України, 2002. — 18 с.

55. Насіння сільськогосподарських культур. Методи визначення якості : ДСТУ 4138-2002. — Київ : Держспоживстандарт України, 2003. — 173 с.
56. Продукти перероблення фруктів та овочів. Методи визначення сухих речовин : ДСТУ 4404:2005. — Київ : Держспоживстандарт України, 2006. — 22 с.
57. ДСТУ ISO 45001:2018. Системи управління охороною здоров'я та безпекою праці. Вимоги та настанови щодо застосування. — Київ: ДП «УкрНДНЦ», 2019.
58. Охорона праці в сільському господарстві: навчальний посібник / за ред. В. П. Желіба. — Київ: Знання, 2020.
59. Закон України «Про охорону праці». — Відомості Верховної Ради України, 1992, №49; із змінами та доповненнями.
60. ДСТУ ISO 12100:2011. Безпека машин. Основні поняття, загальні принципи проектування. — Київ: ДП «УкрНДНЦ», 2012.
61. Дрозд М. С., Мартинюк П. М. Охорона праці та безпека життєдіяльності: підручник. — Київ: Центр учбової літератури, 2021.
62. ДСТУ 2990-94. Транспортні засоби та механізми. Загальні вимоги безпеки. — Київ: Держстандарт України, 1994.
63. ДСТУ ISO 45001:2018. Системи управління охороною здоров'я та безпекою праці. Вимоги та настанови щодо застосування. — Київ: ДП «УкрНДНЦ», 2019.
64. Гандзюк М. П., Кундієв Ю. І. Професійна гігієна та охорона праці: підручник. — Київ: Медицина, 2020.
65. ДСТУ 7035-95. Медичні огляди працівників. Порядок проведення та вимоги. — Київ: Держстандарт України, 1995.
66. ДСТУ 2778-94. Інструктажі з охорони праці. Загальні положення. — Київ: Держстандарт України, 1994.
67. ДСТУ ISO 45001:2018. Системи управління охороною здоров'я та безпекою праці. Вимоги та настанови щодо застосування. — Київ: ДП «УкрНДНЦ», 2019.