

ХМЕЛЬНИЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет технологій і дизайну  
Кафедра хімії та хімічної інженерії

**КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА**

Розробка екологічно безпечних систем удобрення для зниження негативного впливу на довкілля

Рівень вищої освіти – другий магістерський

Галузь знань 16 – «Хімічна інженерія та біоінженерія»

Спеціальність 161 – «Хімічні технології та інженерія»


Освітня програма – «Хімічні технології та інженерія»

КвРХТІ.024125.01.10.ПЗ

Виконала: студентка 2 курсу  
групи ХТІмз-24-1

 Ілона ЗАДЕРЕЙ

Керівник: кандидат техн. наук,  
доцент

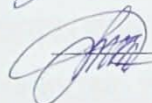
 Ганна ТКАЧУК

Нормоконтролер

 Олександр СТРЕМЕЦЬКИЙ

До захисту допускаю:

Зав. кафедри хімії та хімічної  
інженерії

 Ольга ПАРАСКА

22.12.2025

Хмельницький 2025

## РЕФЕРАТ

Кваліфікаційна робота на тему: Розробка екологічно безпечних систем удобрення для зниження негативного впливу на довкілля.

Автор роботи: здобувачка вищої освіти групи ХТІмз-24-1 Ілона ЗАДЕРЕЙ

Керівник роботи: кандидат технічних наук, доцент Ганна ТКАЧУК

Обсяг кваліфікаційної роботи 63 сторінки, 6 таблиць, 5 обчислювальних формул, 9 рисунків, 34 джерела посилання, графічної частини 11 слайдів.

Ключові слова: БІОДОБРИВА, КОМПЛЕКСНІ ДОБРИВА; МІНЕРАЛЬНІ ДОБРИВА; ОРГАНІЧНІ ДОБРИВА; ТЕХНОЛОГІЯ ВИРОБНИЦТВА ДОБРІВ; УДОБРЕННЯ.

Метою кваліфікаційної роботи є розробка та обґрунтування екологічно безпечної технології виробництва та застосування добрив, спрямованої на збереження довкілля.

Об'єкт дослідження – технологічні процеси виробництва мінеральних та органо-мінеральних добрив.

Предмет дослідження – мінеральні та органо-мінеральні добрива.

Методи досліджень – теоретичні методи, метод оцінки, математичні та статистичні методи, моделювальні методи, розрахунково-конструктивні методи, метод прогнозування.

Практичне значення роботи полягає у можливості впровадження розроблених рішень у промислове виробництво, що сприятиме зменшенню викидів, раціональному використанню сировини та покращенню стану довкілля у регіонах із розвинутою хімічною промисловістю.

19.12.2025 р.

Здобувачка вищої освіти групи ХТІмз-24-1 \_\_\_\_\_ Ілона ЗАДЕРЕЙ

## ЗМІСТ

	С.
Вступ.....	3
1 Теоретичні основи технології виробництва мінеральних добрив.....	6
1.1 Класифікація мінеральних добрив .....	8
1.2 Сировинна база для виробництва добрив: природні, техногенні та відновлювані ресурси.....	11
1.3 Основні принципи побудови технологічних схем виробництва добрив.....	15
2 Аналіз сучасних технологій виробництва нітрогенних, фосфорних та комплексних добрив.....	30
2.1 Технологія виробництва фосфатних добрив .....	31
2.2 Технологічні процеси виробництва азотних добрив.....	35
2.3 Технології отримання комплексних добрив (NPK, NP, PK).....	38
3 Удосконалення технології виробництва екологічно безпечної системи удобрення.....	44
3.1 Розробка технологічної схеми виробництва екологічно безпечного добрива.....	45
3.2 Вибір та розрахунок основного технологічного обладнання.....	51
Висновки.....	58
Перелік джерел посилання.....	60

## ВСТУП

Раціональне використання добрив у сучасному аграрному виробництві є одним із ключових факторів забезпечення продовольчої безпеки, стабільного розвитку сільського господарства та підвищення родючості ґрунтів. Добрива відіграють визначальну роль у формуванні продуктивності рослин, балансі елементів живлення та стабільності агроєкосистем. За даними міжнародних агрохімічних організацій, від 50 до 60 % приросту врожайності сільськогосподарських культур у світі забезпечується саме завдяки внесенню мінеральних та органо-мінеральних добрив. Проте, попри їх високу ефективність, традиційні системи удобрення та технології виробництва мінеральних добрив нерідко супроводжуються значними екологічними ризиками, що з кожним роком набувають все більшої актуальності.

Сучасний стан навколишнього природного середовища, зростання світового населення, підвищення потреб у продовольстві та розвиток інтенсивного землеробства вимагають принципово нових підходів до виробництва та застосування добрив. Суспільство поступово переходить від моделі екстенсивного використання ресурсів до концепції сталого розвитку, в основі якої – економне використання сировини, мінімізація забруднення довкілля та збереження природних ресурсів для майбутніх поколінь. Одним із ключових аспектів цієї концепції є впровадження екологічно безпечних систем удобрення, що поєднують високу агрономічну ефективність із мінімальним впливом на екосистеми.

У цьому контексті особливої актуальності набувають технології виробництва добрив, які базуються на енергоефективних, маловідходних та ресурсозберігаючих процесах. Такі технології передбачають використання сучасних методів очищення повітря та води, зменшення викидів шкідливих газів, оптимізацію хімічних реакцій, переробку побічних продуктів і впровадження замкнутих виробничих циклів. Крім того, велике значення має розробка та впровадження органо-мінеральних та комплексних добрив, які

забезпечують більш рівномірне та тривале постачання елементів живлення до рослин, зменшуючи ризик забруднення навколишнього середовища.

Актуальність теми роботи зумовлена необхідністю гармонізації національних стандартів якості добрив з європейськими нормами. Перехід до стандартів ЄС передбачає жорсткий контроль за вмістом важких металів, токсичних елементів, домішок та шкідливих речовин у мінеральних добривах. Це потребує модернізації виробництва, впровадження нових технологічних схем, вдосконалення систем очищення та розробки нових рецептур добрив, які відповідатимуть вимогам як ефективності, так і безпеки.

Усе вищезазначене свідчить про необхідність комплексного наукового підходу до створення екологічно безпечних систем удобрення, які включають дослідження технологічних процесів виробництва, аналіз їх екологічних ризиків, розробку нових технологічних рішень, оптимізацію складу добрив та оцінку їх впливу на ґрунтові та екосистемні процеси.

Таким чином, тема даної кваліфікаційної роботи є актуальною, оскільки вона передбачає дослідження і розробку сучасних систем удобрення, що поєднують високу агрохімічну ефективність із екологічною безпекою, відповідають європейським вимогам та можуть бути практично реалізовані у промислових умовах.

Метою кваліфікаційної роботи є розробка та обґрунтування екологічно безпечної технології виробництва та застосування добрив, спрямованої на збереження довкілля.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі завдання:

- проаналізувати сучасний стан виробництва та застосування добрив, визначити основні екологічні проблеми;
- дослідити традиційні та сучасні технології виробництва добрив, оцінити їх вплив на навколишнє середовище;
- обґрунтувати вибір сировини та технологічних параметрів для виробництва екологічно безпечних добрив;

- запропонувати технологічну схему виробництва добрива з урахуванням принципів маловідходності та енергоефективності;
- провести екологічний аудит виробничого процесу;
- оцінити можливий вплив запропонованої системи удобрення на ґрунт, рослини та екосистеми;
- сформулювати рекомендації щодо впровадження екологічно безпечних технологій у промислове виробництво.

Для виконання визначених завдань і перевірки припущення були задіяні такі методи дослідження: теоретичні методи, метод оцінки, математичні та статистичні методи, моделювальні методи, розрахунково-конструктивні методи, метод прогнозування.

Об'єкт дослідження – технологічні процеси виробництва мінеральних та органо-мінеральних добрив.

Предмет дослідження – мінеральні та органо-мінеральні добрива.

Практичне значення роботи полягає у можливості впровадження розроблених рішень у промислове виробництво, що сприятиме зменшенню викидів, раціональному використанню сировини та покращенню стану довкілля у регіонах із розвинутою хімічною промисловістю. Кваліфікаційна робота складається з вступу, трьох розділів та висновків. Обсяг кваліфікаційної роботи 63 сторінки, 6 таблиць, 9 рисунків, 5 обчислювальних формул, 34 джерела посилання, графічна частина створена у програмі презентації PowerPoint (11 слайдів).

# 1 ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ТЕХНОЛОГІЇ ВИРОБНИЦТВА МІНЕРАЛЬНИХ ДОБРИВ

Сучасне сільське господарство неможливе без застосування мінеральних добрив, адже вони забезпечують високий рівень продуктивності рослин, стабільність урожайності та покращення родючості ґрунтів. Зростання населення, зміна клімату, деградація ґрунтів, виснаження природних ресурсів та необхідність підвищення ефективності аграрного сектору зумовлюють постійну потребу у вдосконаленні технологій виробництва добрив. Особливого значення набувають екологічно безпечні системи удобрення, які не лише підвищують урожайність, а й зменшують негативний вплив на екосистеми [1].

Проблема екологізації виробництва мінеральних добрив є однією з ключових у хімічній та агрохімічній промисловості. Традиційні технології супроводжуються утворенням викидів оксидів азоту, аміаку, сірчистих газів, запиленості, стічних вод із підвищеним вмістом фосфатів, нітратів та продуктів нейтралізації. Крім того, у виробництві фосфорних добрив використовується природний фосфорит, у складі якого можуть міститися радіонукліди та важкі метали, що також потребує належного контролю і очищення [2].

На сьогодні, відповідно до європейських вимог (BREF, BAT), підприємства з виробництва добрив повинні забезпечувати мінімізацію викидів, зменшення споживання енергії, впровадження систем рециркуляції води, використання маловідходних або безвідходних технологій. Це передбачає зміну технічних рішень, модернізацію технологічних ліній, зменшення утворення побічних продуктів та перехід до використання прогресивного обладнання [3].

У сучасних умовах функціонування хімічної промисловості виробничі підприємства, що спеціалізуються на виготовленні органо-мінеральних та мінеральних добрив, зобов'язані дотримуватися вимог, визначених

європейськими нормативними документами BREF та принципами найкращих доступних технологій (BAT). Ці регламенти встановлюють підвищені критерії екологічної та енергетичної ефективності, які передбачають суттєве обмеження обсягів викидів забруднювальних речовин у атмосферне повітря, водні об'єкти та ґрунт, а також забезпечення раціонального використання природних ресурсів у межах усього виробничого циклу.

Зокрема, підприємства повинні впроваджувати технологічні підходи, спрямовані на зменшення енергоємності процесів, оптимізацію балансу матеріальних потоків та створення систем замкнутого водокористування, що забезпечують повторне використання технологічних стічних вод після відповідного очищення. Важливою складовою таких вимог є застосування маловідходних або повністю безвідходних технологічних рішень, здатних забезпечити максимально ефективно перетворення сировинних компонентів у кінцеву продукцію з мінімальними втратами та зниженою екологічною небезпекою.

Реалізація цих принципів потребує глибокого перегляду наявних технічних рішень, модернізації основних і допоміжних виробничих ліній, а також удосконалення апаратурного оформлення процесів. Зменшення обсягів утворення побічних продуктів та відходів досягається шляхом оптимізації хімічних і фізико-хімічних стадій, підвищення точності дозування реагентів, використання каталізаторів нового покоління та запровадження автоматизованих систем керування. Особливе значення має перехід до застосування сучасного високотехнологічного обладнання, що забезпечує стабільність параметрів, підвищення виходу цільової продукції та зниження навантаження на довкілля.

Такі заходи не лише дозволяють підприємствам відповідати чинним екологічним стандартам ЄС, але й сприяють розвитку конкурентоспроможного та технологічно орієнтованого виробництва добрив, здатного адаптуватися до нових вимог сталого розвитку та еволюції ринку агрохімічної продукції.

Водночас для підвищення екологічності аграрного сектора важливе значення має система удобрення, яка включає тип, форму, спосіб внесення та терміни застосування добрив. Правильно розроблена система удобрення дозволяє підвищити коефіцієнт засвоєння елементів живлення рослинами, зменшити втрати азоту через денітрифікацію або вимивання, знизити ризики забруднення поверхневих і ґрунтових вод, а також запобігати деградації ґрунтів [1].

Таким чином, питання вибору оптимальної технології виробництва мінеральних добрив є фундаментальним для формування ефективної та екологічно безпечної системи удобрення.

### 1.1 Класифікація мінеральних добрив

Мінеральні добрива є невід’ємним компонентом сучасних інтенсивних систем землеробства. Вони складаються з неорганічних сполук, здатних забезпечити оптимальний баланс макро- та мікроелементів у родючому шарі ґрунту. Основна функція мінеральних добрив полягає у поповненні запасів поживних речовин, необхідних для повноцінного росту та розвитку рослин, підвищення їх продуктивності та якості продукції. Виробництво мінеральних добрив здійснюється як із природної сировини (фосфорити, калійні солі, природні нітрати), так і на основі промислових побічних продуктів (амонійні солі, сульфати, виробничі концентрати) [4].

Використання мінеральних добрив є ключовим для ефективного вирощування зернових, овочевих, плодкових, ягідних та декоративних культур. Вони забезпечують формування міцної кореневої системи, розвиток вегетативної маси, синтез білків та хлорофілу, що безпосередньо впливає на врожайність [5].

За хімічним складом мінеральні добрива поділяються на наступні типи [6, 7]:

Азотні (N) – містять азот у нітратній, амонійній або амідній формі. Наприклад, аміачна селітра ( $\text{NH}_4\text{NO}_3$ ), карбамід ( $\text{CO}(\text{NH}_2)_2$ ), сульфат амонію ( $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ ), аміачна вода, КАС (карбамідно-аміачна суміш).

Агрохімічний ефект: стимулюють інтенсивний ріст зелених частин рослин, прискорюють синтез білків і хлорофілу. Внесення від 120 до 150 кг/га азоту у вигляді карбаміду під озиму пшеницю забезпечує приріст врожаю на від 20 до 25 % у порівнянні з контролем без добрив.

Фосфорні (P) – джерело ортофосфатів або поліфосфатів. Наприклад, простий і подвійний суперфосфат, діамонійфосфат (DAP), аммофос.

Агрохімічний ефект: стимулюють розвиток кореневої системи, підвищують зимостійкість та енергетичний обмін. Внесення від 60 до 80 кг/га  $\text{P}_2\text{O}_5$  під кукурудзу у вигляді діамонійфосфату підвищує масу зерна на від 15 до 20 %.

Калійні (K) – забезпечують рослини калієм у вигляді хлоридної, сульфатної або змішаної форми. Наприклад, калій хлористий (KCl), сульфат калію ( $\text{K}_2\text{SO}_4$ ), калій-магnezія.

Агрохімічний ефект: підвищують стійкість до посухи та хвороб, покращують якість продукції (цукристість буряку, крохмалистість картоплі). Внесення від 80 до 100 кг/га  $\text{K}_2\text{O}$  під соняшник підвищує олійність насіння на від 3 до 5 %.

Комплексні (NPK, NP, PK) – містять два або три основні елементи живлення. Наприклад, нітроаммофоска, нітрофоска, комплексні гранульовані добрива (16:16:16).

Агрохімічний ефект: забезпечують рівномірне надходження всіх необхідних елементів, зменшують витрати на окремі добрива. Використання гранульованої нітроаммофоски під озимий ріпак у нормі 300 кг/га забезпечує рівномірне живлення протягом вегетації.

Мікродобрива – містять мікроелементи (Fe, Mn, Zn, Cu, B, Mo, Co) у доступній для рослин формі [7].

Агрохімічний ефект: впливають на активність ферментів, синтез хлорофілу та білків, підвищують стійкість до стресових умов. Застосування борного хелату у нормі 0,5 кг/га під ріпак підвищує продуктивність насіння та зменшує розтріскування стебел.

Мінеральні добрива можуть мати різну фізичну форму [8]:

– гранульовані – зручні для механізованого розкидання, стійкі до злежування та запилення;

– порошкоподібні – використовуються переважно для змішування та виготовлення комплексних сумішей;

– рідкі – включають КАС та водорозчинні комплекси, застосовуються у системах фертигації або підживлення;

Сучасні сільськогосподарські машини обладнані системами для одночасного внесення добрив і посіву, що дозволяє підвищити ефективність використання поживних речовин та зменшити витрати пального.

Вибір оптимальної норми і часу внесення визначається типом ґрунту, видом культури та її фазою розвитку [9]:

Основне внесення (осіннє або весняне) – забезпечує базову кількість поживних речовин у ґрунті. Наприклад, від 100 до 120 кг/га N, від 60 до 80 кг/га P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> та від 80 до 100 кг/га K<sub>2</sub>O під зернові колосові.

Посівне добриво – вноситься одночасно із насінням для забезпечення стартового живлення. Приклад: від 20 до 30 кг/га N, від 20 до 30 кг/га P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> під кукурудзу.

Підживлення в період вегетації – спрямоване на підтримку росту і розвитку рослин. Наприклад, внесення КАС від 30 до 50 кг/га під озимий ріпак у фазу від 4 до 6 листків.

Вплив мінеральних добрив на різні групи культур. Зернові та кормові культури – отримують максимальний ефект від комплексних NPK-добрив.

Овочеві культури – високочутливі до форми і строків внесення; оптимальні гранульовані та рідкі розчини.

Плодово-ягідні культури – потребують поступового підживлення, особливо калієм та мікроелементами.

Декоративні рослини – потребують регульованого внесення, оскільки надлишок азоту може стимулювати надмірний ріст і знизити декоративні властивості.

Рослини, що походять зі степів та напівпустель, не потребують концентрованих мінеральних добрив. Їхнє внесення може викликати надмірний ріст і порушити баланс розвитку [10].

## 1.2 Сировинна база для виробництва добрив: природні, техногенні та відновлювані ресурси

Ефективне виробництво мінеральних добрив неможливе без забезпечення стабільної та достатньої сировинної бази, яка включає природні мінеральні ресурси, побічні продукти промисловості та відновлювані матеріали органічного або біологічного походження. Сировинна база визначає не лише технологічні можливості підприємств, але й якість кінцевого продукту, ступінь його засвоєння рослинами, а також екологічну безпечність процесів виробництва та експлуатації добрив [11].

Сировинні ресурси для виробництва мінеральних добрив можна класифікувати на три основні групи [12]:

- природна сировина – мінеральні родовища, солі та гірські породи;
- техногенна сировина – побічні продукти хімічної, металургійної та енергетичної промисловості;
- відновлювані ресурси – органічні та біологічні матеріали, які підлягають переробці для отримання органо-мінеральних або мінеральних добрив.

Природна сировина є базовим компонентом для виробництва більшості мінеральних добрив. Вона включає азотні, фосфорні та калійні мінерали, а також вторинні макро- і мікроелементи.

Азотна сировина. До природних джерел азоту належать нітрати, амонієві солі та окремі органічні відкладення.

Натрієва селітра ( $\text{NaNO}_3$ ) – природний нітрат, видобувається в родовищах Чилі, застосовується як мінеральне добриво та хімічний реагент.

Аммонієві солі – осадові утворення, що містять амонійні сполуки, зустрічаються рідко та зазвичай у невеликих концентраціях.

Азотні мінерали відзначаються високою концентрацією азоту та забезпечують його швидке засвоєння рослинами. Обмеженість природних запасів азотної сировини сприяє розвитку синтетичних технологій отримання аміаку та карбаміду.

Фосфорна сировина. Основою для виробництва фосфорних добрив є апатити та фосфорити.

Основні родовища та породи: апатити – фосфоритові мінерали з вмістом  $\text{P}_2\text{O}_5$  від 20 до 40 %; фосфорити – карбонатні породи з  $\text{P}_2\text{O}_5$  від 20 до 30 %.

Продукти переробки фосфоритів – термофосфати, преципітати, які служать сировиною для виробництва суперфосфатів та комплексних добрив.

Природні фосфорні мінерали мають низьку водорозчинність, тому для створення ефективних добрив їх обробляють кислотами ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ ,  $\text{H}_3\text{PO}_4$ ) для отримання суперфосфатів, діамонійфосфату та аммофосу. Наприклад, подвійний суперфосфат із вмістом  $\text{P}_2\text{O}_5$  від 46 до 52 % отримують шляхом хімічної обробки апатиту фосфорною кислотою.

Калійна сировина. Калійні добрива виготовляють із мінеральних солей.

Основні мінерали: сильвініт ( $\text{KCl}\cdot\text{NaCl}$ ) – основне джерело хлоридного калію; карналіт ( $\text{KMgCl}_3\cdot 6\text{H}_2\text{O}$ ) – джерело калію та магнію; каїніт ( $\text{KClMgSO}_4\cdot 3\text{H}_2\text{O}$ ) – використовується для виробництва сульфатних калійних добрив.

В Україні виробництво калійних добрив значною мірою базується на імпорті сировини із Канади через обмежені власні родовища [13].

Сульфатна сировина та вторинні елементи. До природної сировини також належать сірчані мінерали та мінерали кальцію і магнію [14]:

Гіпс ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ) – використовується для виробництва суперфосфатів і як джерело кальцію.

Доломіт ( $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$ ) – застосовується для нейтралізації кислотності ґрунтів та виробництва калійно-кальцієвих комплексних добрив.

Ці компоненти не лише забезпечують рослини поживними елементами, але й покращують фізичні властивості ґрунту, та сприяють оптимальному водно-повітряному режиму [15].

Техногенна сировина утворюється як побічний продукт хімічних, металургійних та енергетичних виробництв. Використання таких матеріалів дозволяє значно знизити витрати на первинну сировину та мінімізувати екологічний вплив промислових відходів [16].

Побічні продукти хімічної промисловості. Аміачна вода та газоподібний аміак – продукти синтезу азоту з повітря та водню (метод Габера-Боша), використовуються як база для карбаміду, аміачної селітри та КАС.

Фосфорна кислота та шлами фосфатного виробництва застосовуються для виробництва суперфосфатів і діамонійфосфату.

Сульфат амонію – утворюється як побічний продукт при виробництві фосфатних добрив. Наприклад, у виробництві аммофосу фосфорна кислота взаємодіє з аміачною водою, утворюючи добриво з високим вмістом азоту та фосфору.

Відходи металургії та енергетики. Зола ТЕС та ТЕЦ – джерело калію, кальцію, магнію та сірки.

Фосфорні шлами – вторинне джерело  $\text{P}_2\text{O}_5$ .

Нітратні відходи – потенційне джерело амонійних і нітратних добрив.

Використання техногенних матеріалів вимагає ретельного контролю вмісту важких металів та інших домішок, щоб уникнути забруднення ґрунтів та харчових продуктів [17].

Відновлювані ресурси включають органічні та біологічні матеріали, які можуть бути перероблені для отримання органо-мінеральних та мінеральних добрив [18].

Органічні відходи: компости з рослинних залишків; гній та курячий послід; торф'яні суміші [19].

Переробка органічних відходів дозволяє отримувати добрива з поступовим виділенням азоту і фосфору, що зменшує ризик забруднення ґрунтових і підземних вод.

Біологічні та мікробіологічні продукти: бактерії та мікроорганізми, що фіксують азот (*Azotobacter*, *Rhizobium*); продукти ферментації рослинної сировини, що містять розчинні форми фосфатів та калію.

Залучення біологічних та хімічних ресурсів у технологічні процеси виробництва добрив забезпечує формування продукції, що характеризується високим рівнем екологічної безпеки та природною відповідністю агросистемам. Використання мікроорганізмів, продуктів їх метаболізму, органічних залишків та інших біологічно активних компонентів сприяє створенню добрив, які не лише забезпечують рослини необхідними поживними елементами, а й стимулюють відновлення природної структури ґрунту, активізацію корисної мікрофлори та покращення фізико-хімічних показників ґрунтового середовища.

Важливою перевагою впровадження таких якісних ресурсів є можливість підтримання й поступового підвищення природної родючості ґрунтів на тривалий період, оскільки вони не спричиняють накопичення токсичних залишків, не порушують біологічну рівновагу та не призводять до деградаційних процесів. Біологічні добрива сприяють покращенню гумусового стану, формуванню стійкої структури ґрунтових агрегатів, підвищенню водоутримувальної здатності та загальної біологічної активності ґрунту.

Використання таких біологічних ресурсів сприяє виробництву екологічно безпечних добрив і підвищенню родючості ґрунтів без надмірного навантаження на екосистему [20].

Сировинна база визначає географію розташування підприємств, логістику та собівартість виробництва.

В Україні значна частина фосфоритної сировини імпортується з Південної Америки та Північної Африки.

Азотні добрива виробляються на основі місцевого аміаку та карбаміду.

Калійні добрива значною мірою імпортуються через обмежені запаси власних родовищ.

Розвиток локальної переробки техногенних і відновлюваних ресурсів дозволяє знизити залежність від імпорту та підвищити економічну ефективність виробництва добрив [21].

### 1.3 Основні принципи побудови технологічних схем виробництва добрив

Виробництво мінеральних добрив є багатоступеневим технологічним процесом, що включає комплексну хімічну, фізико-хімічну та механічну обробку сировини, а також підготовку готового продукту до транспортування, зберігання та внесення у ґрунт. Ефективність даного процесу визначається як агрохімічними характеристиками добрив, так і економічними та екологічними показниками виробництва. Основними принципами побудови технологічних схем є раціональне використання сировинної бази, мінімізація втрат поживних елементів, забезпечення екологічної безпеки та досягнення економічної ефективності виробництва.

Підготовка сировини є одним із ключових етапів виробництва, що визначає якість та стабільність кінцевого продукту.

До цього етапу входять:

Вибір і сортування сировини – природні мінерали (фосфорити, апатити, силвінітові руди), техногенні відходи та органічні компоненти відбираються з урахуванням їх хімічного складу та фізико-механічних характеристик, що забезпечує оптимальну реакційну здатність та однорідність майбутнього продукту.

Подрібнення та просіювання – сировина подрібнюється до визначених фракцій, що сприяє рівномірному змішуванню компонентів та покращенню грануляції.

Очищення від домішок – застосовуються механічні, магнітні та хімічні методи видалення небажаних включень, що підвищує ефективність використання добрив та стабільність їх хімічного складу [21].

Для біологічних компонентів, таких як мікроорганізми та біодобрива, підготовчий етап включає культивуацію та адаптацію до ґрунтових умов, що забезпечує їх життєздатність та активність після внесення у ґрунт.

Механічне змішування передбачає рівномірне поєднання моноелементних добрив у заданих пропорціях. Основна мета – забезпечення однорідності суміші, що визначає точність внесення поживних речовин у ґрунт. Перевагами цього методу є простота технологічного процесу, низькі капітальні та енергетичні витрати. Недоліки включають можливе розшарування гранул під час транспортування та часткову хімічну взаємодію компонентів, що може впливати на ефективність добрив.

Хімічні методи дозволяють формувати стабільні хімічні комплекси та підвищують біодоступність поживних елементів для рослин. Ці технології є особливо доцільними при виробництві спеціалізованих комплексних добрив з оптимальним співвідношенням макро- та мікроелементів.

Гранулювання визначає фізичні характеристики добрив та їх зручність у використанні. Процес включає: формування гранул заданого розміру та механічної міцності; покращення однорідності розподілу поживних елементів; зменшення пиління та втрат продукту під час транспортування та внесення. Агломерація спрямована на утворення більш великих часток добрива шляхом склеювання дрібних фракцій із застосуванням зв'язуючих матеріалів, що підвищує щільність та механічну стабільність гранул.

Сушіння гранул забезпечує приведення їх вологості до оптимального рівня, що гарантує стабільність фізико-хімічних характеристик продукту та збереження активності біологічних компонентів. Охолодження грає ключову

роль у підготовці гранул до пакування та транспортування, запобігає агломерації та втраті вологи. Контроль температурного режиму на даному етапі є критично важливим для збереження поживних властивостей добрив.

Готове добриво упаковується у герметичну тару (мішки, бункери, біорозкладні пакети), що забезпечує збереження фізико-хімічних та біологічних властивостей продукту. У сучасних технологіях використовуються пакувальні матеріали, придатні до переробки або біологічного розкладання, що відповідає принципам екологічної безпеки. Дотримання умов пакування та зберігання гарантує тривалий термін придатності добрив без втрати поживних елементів.

Сучасний етап розвитку виробництва мінеральних добрив характеризується впровадженням технологічних рішень, спрямованих на комплексне підвищення ефективності та технологічної безпечності промислових процесів. Одним із ключових напрямів є зростання енергоефективності, що передбачає оптимізацію теплових і масообмінних операцій, удосконалення режимів роботи апаратів, застосування енергозаощаджувального обладнання та впровадження систем збереження тепла. Такі заходи забезпечують зниження витрат енергоресурсів і підвищують загальну продуктивність технологічних ліній.

Важливим завданням залишається мінімізація втрат основних елементів живлення (азоту, фосфору та калію) на всіх стадіях виробничого циклу. Це досягається за рахунок удосконалення процесів абсорбції та грануляції, використання більш ефективних каталізаторів, контролю параметрів реакційних середовищ і застосування технологій, що забезпечують стабільність складу кінцевого продукту. Зменшення втрат поживних компонентів не лише підвищує вихід добрив, а й знижує ризики негативного впливу на довкілля.

Окрему увагу приділено раціональному використанню відходів виробництва, включно з утилізацією побічних продуктів та їх залученням у замкнуті технологічні цикли. Використання вторинної сировини дозволяє

зменшити обсяг техногенних викидів, скоротити потребу в первинних ресурсах і підвищити екологічну стійкість виробничих процесів.

Не менш важливою складовою сучасних технологій є забезпечення високого рівня технологічної безпеки. Це охоплює зниження емісій газоподібних і пилових забруднень, модернізацію систем очищення стічних вод, мінімізацію утворення небезпечних відходів та впровадження принципів доступних технологій. Усі ці заходи спрямовані на досягнення відповідності міжнародним стандартам якості та екологічним регламентам, що визначають вимоги до хімічної промисловості у глобальному контексті.

У сукупності такі технологічні та управлінські рішення формують основу для розвитку конкурентоспроможного, ресурсоефективного та екологічно орієнтованого виробництва мінеральних добрив, здатного відповідати сучасним тенденціям сталого розвитку.

Таким чином сучасні технології виробництва мінеральних добрив спрямовані на: підвищення енергоефективності виробничих процесів, зменшення втрат азоту, фосфору та калію; раціональне використання відходів виробництва; забезпечення екологічної безпеки та відповідність міжнародним стандартам якості.

Інтеграція всіх технологічних етапів дозволяє отримати продукт високої якості з рівномірною гранулометриєю, стабільним хімічним складом та підвищеною ефективністю засвоєння поживних речовин рослинами. Системний підхід до проектування технологічних схем виробництва мінеральних добрив забезпечує не лише підвищення врожайності та покращення якості продукції сільського господарства, а й мінімізацію негативного впливу на ґрунтові та водні екосистеми, що відповідає принципам сталого розвитку аграрного сектору.

Технологічний процес виробництва мінеральних добрив, що враховує всі перелічені принципи, наведено у таблиці 1.1, де поетапно відображено обробку сировини, гранулювання, сушіння, охолодження та підготовку готового продукту до зберігання і транспортування.

Таблиця 1.1 – Стадії виробництва мінеральних добрив

Стадія виробництва	Опис процесу	Призначення
Підготовка сировини	Дроблення, просіювання, сушіння, очищення	Забезпечує необхідний розмір частинок та видалення домішок
Хімічна обробка	Реакції з кислотами, аміачними розчинами, нейтралізація	Формування розчинних форм поживних елементів
Грануляція, кристалізація	Формування гранул або кристалів потрібної форми	Забезпечує зручність транспортування та рівномірне внесення
Сушіння та охолодження	Зменшення вологості та стабілізація продукту	Запобігає злежуванню та покращує фізичні властивості
Просіювання та пакування	Відокремлення гранул різного розміру, фасування	Гарантує стандартизовану якість продукту

Синтез аміаку є фундаментальним процесом у виробництві азотних добрив, оскільки він забезпечує основу для отримання більшості промислових форм азотних сполук. До основних азотних добрив, які виробляються на базі синтезованого аміаку, належать аміачна селітра, карбамід (сечовина) та комплексні розчини типу КАС (карбамідно-аміачна суміш).

Аміачна селітра ( $\text{NH}_4\text{NO}_3$ ) є одним із найпоширеніших азотних добрив завдяки високому вмісту доступного азоту та швидкому ефекту дії. Виробництво аміачної селітри передбачає нейтралізацію азотної кислоти аміаком та гранулювання отриманої суміші для полегшення транспортування та внесення.

Карбамід (сечовина,  $\text{CO}(\text{NH}_2)_2$ ) характеризується високою концентрацією азоту та використовується як для прямого внесення у ґрунт, так і для приготування рідких азотних комплексів. Технологічний процес включає реакцію аміаку з вуглекислим газом, утворення гранул та їх сушіння для стабілізації продукту [22].

КАС (карбамідно-аміачна суміш) є рідким добривом, що містить аміак та карбамід у водному розчині. Завдяки універсальності застосування та можливості внесення через систему крапельного зрошення, КАС набуває дедалі більшого поширення в сучасному сільському господарстві.

Усі зазначені добрива виробляються на основі синтезу аміаку, який здійснюється за допомогою каталізованої реакції водню та азоту під високим тиском та температурою. Отриманий аміак виступає вихідним компонентом для подальшого виробництва різних форм азотних добрив, що дозволяє забезпечити широкий спектр агрохімічних потреб.

На рисунку 1.1 наведено схему технологічного процесу виробництва основних азотних добрив на базі синтезованого аміаку, включаючи стадії підготовки сировини, хімічного синтезу, гранулювання, сушіння та пакування готової продукції.

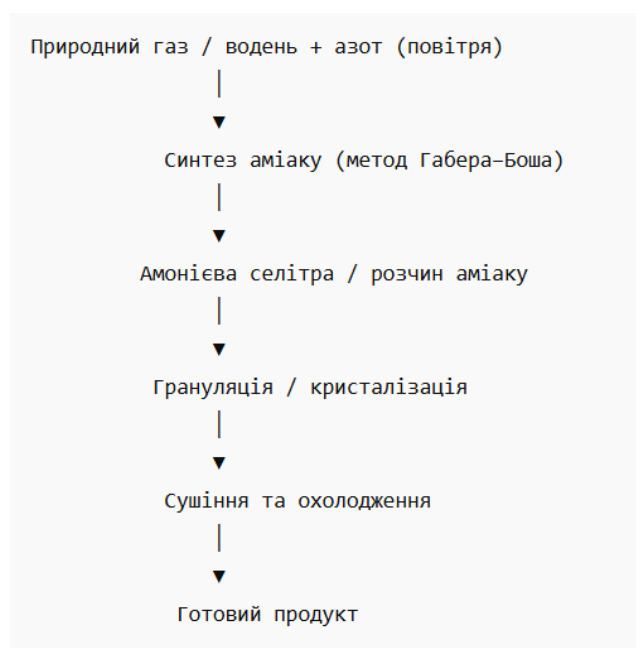


Рисунок 1.1 – Виробництво аміачної селітри

Фосфорні добрива є ключовим компонентом систем живлення рослин, оскільки забезпечують надходження фосфору – одного з основних макроелементів, що беруть участь у процесах енергетичного обміну, синтезі нуклеїнових кислот, формуванні кореневої системи та розвитку репродуктивних органів рослин. Основною сировинною базою для їх виробництва є природні фосфатні руди, до яких належать апатити, фосфорити та деякі техногенні відходи, що містять сполуки фосфору.

Процес промислового виробництва фосфорних добрив передбачає кислотну обробку фосфатних руд, що дозволяє перевести важкорозчинні сполуки фосфору у розчинні форми, доступні для засвоєння рослинами. Найпоширенішими технологіями є обробка фосфатів сірчаною кислотою для отримання суперфосфатів, а також використання фосфорної кислоти для виробництва подвійного суперфосфату та складних фосфорно-мінеральних комплексів.

В ході кислотного оброблення відбувається реакція між фосфатною рудою та кислотним реагентом, що приводить до утворення водорозчинних фосфатів, які формують основу для подальших гранульованих, кристалічних або порошкоподібних добрив. Цей етап технологічного процесу є критичним для забезпечення високої ефективності продукту, оскільки визначає концентрацію доступного фосфору, гранулометрію та стабільність хімічного складу добрива [23].

Після кислотної обробки продукт піддається гранулюванню та агломерації, що дозволяє отримати гранули заданого розміру та підвищеної механічної міцності. Такі операції сприяють зменшенню пиління, покращують рівномірність внесення та підвищують стійкість добрив до умов зберігання і транспортування. Додатково здійснюється сушіння та охолодження гранул до оптимальної вологості, що забезпечує стабільність фізико-хімічних властивостей та тривалий термін придатності продукту.

Виробництво фосфорних добрив також передбачає суворий контроль якості сировини, концентрації кислотного реагенту, температури та тривалості

реакційного процесу, що забезпечує оптимальний вихід продукції та мінімізацію втрат цінних поживних елементів. Сучасні технології спрямовані на підвищення ефективності використання фосфорних руд, зменшення утворення відходів та забезпечення екологічної безпеки виробництва.

На рисунку 1.2 представлено схему технологічного процесу виробництва фосфорних добрив, що включає: підготовку фосфатної сировини, кислотну обробку, гранулювання, сушіння та охолодження готового продукту, а також підготовку його до пакування та транспортування.

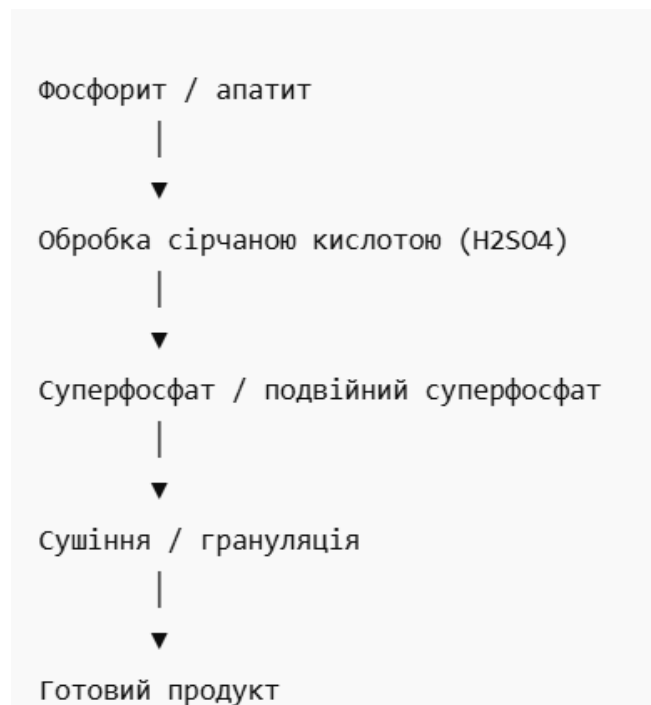


Рисунок 1.2 – Виробництво суперфосфатів

Завдяки впровадженню таких технологій забезпечується отримання фосфорних добрив з високим вмістом водорозчинного фосфору, що гарантує ефективне живлення рослин і підвищує врожайність сільськогосподарських культур при одночасному мінімальному впливі на навколишнє середовище. Фосфорні добрива виробляються із фосфатних руд шляхом кислотного оброблення для отримання розчинних форм.

Калійні добрива є одним із ключових елементів систем живлення рослин, оскільки калій виконує критично важливу роль у регуляції осмотичного тиску клітин, синтезі білків, фотосинтезі, активації ферментних систем та підвищенні стійкості рослин до стресових умов, таких як посуха, хвороби та низькі температури.

Основними джерелами калію у промисловому виробництві добрив є природні калійні руди, до яких належать сільвініт, карналіт, кішоніт та інші калійні мінерали.

Процес виробництва калійних добрив передбачає комплекс технологічних операцій, серед яких виділяються дроблення, розчинення, кристалізація та грануляція.

Дроблення та подрібнення є початковим етапом підготовки сировини і забезпечує формування часток заданого розміру, що впливає на подальшу ефективність технологічного процесу, рівномірність гранул та швидкість розчинення добрив у ґрунтовому розчині.

Розчинення калійних солей (хлоридів або сульфатів) дозволяє отримати водні розчини, які є основою для виробництва рідких добрив, таких як калійно-аміачні суміші та комплексні водорозчинні сполуки. Розчинення також застосовується для виділення домішок та регулювання хімічного складу кінцевого продукту.

Кристалізація використовується для отримання сухих концентрованих форм калійних добрив із високим вмістом калію ( $K_2O$ ). Цей процес ґрунтується на різниці розчинності компонентів у водному середовищі та дозволяє формувати кристали потрібної фракції та чистоти.

Контроль температури, концентрації та швидкості випаровування розчину є критичними факторами, що визначають фізико-хімічні властивості продукту та його вихід.

Грануляція забезпечує формування часток добрив заданого розміру та щільності, що сприяє полегшеному транспортуванню, внесенню та рівномірному розподілу калію у ґрунті. Важливими параметрами грануляції є

розмір гранул, їх міцність та здатність зберігати вологу, що визначає ефективність використання добрив рослинами [23].

В залежності від типу сировини, технології та цільового призначення продукту, калійні добрива можуть випускатися у вигляді:

- кристалічних солей для прямого внесення у ґрунт;
- гранульованих продуктів для зручності транспортування та застосування;
- водорозчинних сполук для приготування рідких комплексних добрив та систем крапельного зрошення.

Сучасні технології виробництва калійних добрив спрямовані на підвищення концентрації калію у продукції, зменшення вмісту домішок, енергетичну ефективність процесів та мінімізацію впливу на навколишнє середовище.

Особлива увага приділяється розробці безхлорних форм добрив, що дозволяють підвищити врожайність та покращити якість сільськогосподарської продукції, зокрема картоплі, цукрових буряків, винограду та цитрусових культур.

Завдяки інтеграції зазначених технологічних операцій забезпечується виробництво калійних добрив із високою ефективністю засвоєння поживних елементів рослинами, стабільністю фізико-хімічних властивостей та зменшенням негативного впливу на навколишнє середовище.

На рисунку 1.3 наведено схему технологічного процесу виробництва калійних добрив, яка відображає всі основні етапи: підготовку калійних руд, дроблення, розчинення, кристалізацію, грануляцію, сушіння, охолодження та підготовку готового продукту до пакування та транспортування.



Рисунок 1.3 – Виробництво хлористого калію

Комплексні мінеральні добрива являють собою продукцію, що містить одночасно кілька основних макроелементів, необхідних для повноцінного росту і розвитку рослин. Найчастіше вони включають азот (N), фосфор (P) та калій (K), що визначає їх типову класифікацію як NPK-добрива. Комбінація цих елементів у складі одного продукту забезпечує збалансоване живлення рослин, сприяє підвищенню врожайності, покращує якість продукції та оптимізує ефективність використання земельних і виробничих ресурсів.

Комплексні добрива можуть виготовлятися у двох основних формах:

Гранульовані добрива, що представляють собою тверді частки заданого розміру, отримані шляхом гранулювання окремих компонентів. Гранули забезпечують рівномірне внесення поживних речовин у ґрунт, зменшують пиління під час транспортування та внесення, а також підвищують механічну стійкість добрив при зберіганні. Гранулювання дозволяє поєднати компоненти різного хімічного складу у стабільний продукт із передбачуваними агрохімічними властивостями [24].

Водорозчинні суміші, що представляють собою комплексні добрива у рідкій формі, здатні швидко засвоюватися рослинами після внесення через ґрунтове середовище або системи крапельного зрошення. Рідкі форми добрив особливо ефективні для точкового живлення рослин та забезпечення швидкого відновлення дефіциту поживних елементів у критичні періоди росту і розвитку.

Технологічно виробництво комплексних добрив включає декілька стадій:

Підготовка сировини – вибір і попередня обробка моноелементних добрив, що включає подрібнення, просіювання та очищення від домішок.

Механічне або хімічне змішування – забезпечує рівномірне поєднання азоту, фосфору та калію в заданих пропорціях, з можливістю формування стабільних хімічних комплексів.

Гранулювання або приготування водорозчинних сумішей – визначає фізичні властивості кінцевого продукту.

Сушіння та охолодження (для гранульованих форм) – стабілізує вологість і фізико-хімічні характеристики добрива.

Пакування та підготовка до транспортування – забезпечує збереження якості та зручність використання.

Якість мінеральних добрив визначається:

- рівномірністю гранул;
- вологістю;
- хімічним складом та доступністю елементів;
- стійкістю до злежування та пиління.

На рисунку 1.4 наведена схема виробництва комплексних добрив, що ілюструє інтеграцію всіх технологічних операцій – від підготовки сировини до формування готового продукту у гранули або водорозчинну форму.

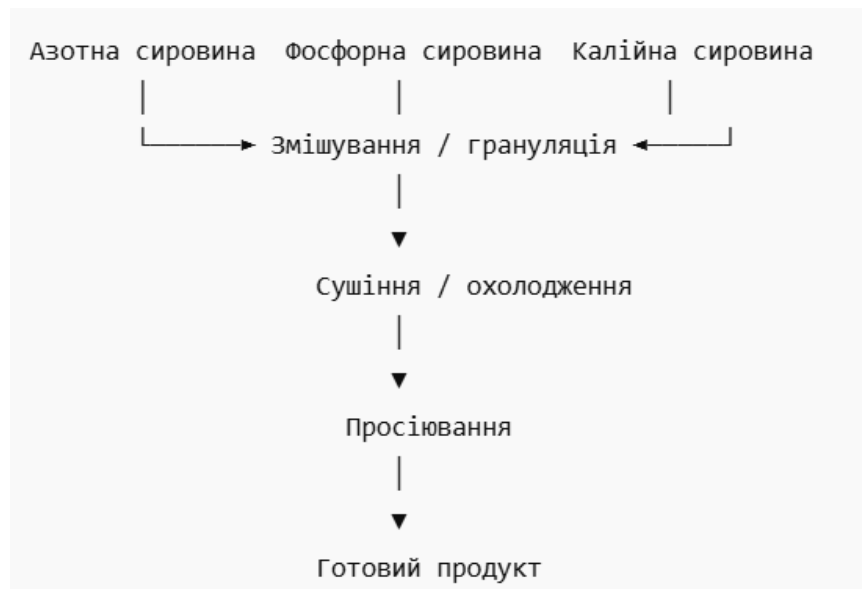


Рисунок 1.4 – Виробництво NPK-гранул

Вимоги до фізико-хімічних властивостей гранульованих добрив представлені у таблиці 1.2.

Таблиця 1.2 Вимоги до фізико-хімічних властивостей гранульованих добрив

Показник	Норма для гранул (мм)	Вологість (%)	Розчинність (%)
Азотні (N)	від 2 до 4	$\leq 1,0$	$\geq 98$
Фосфорні ( $P_2O_5$ )	від 2 до 4	$\leq 1,5$	$\geq 90$
Калійні ( $K_2O$ )	від 2 до 4	$\leq 1,5$	$\geq 95$
Комплексні (NPK)	від 2 до 4	$\leq 1,5$	$\geq 90$

Виробництво мінеральних добрив є складним багатоступеневим технологічним процесом, що включає комплексну послідовність операцій від підготовки сировини до отримання готового продукту, готового до транспортування та застосування у сільському господарстві. Технологічні

схеми формуються з урахуванням типу добрива, фізико-хімічних властивостей компонентів та специфіки кінцевого продукту [25].

Основні етапи технологічного процесу включають:

Підготовку сировини, що передбачає сортування, подрібнення та очищення природних і техногенних матеріалів (амонійної селітри, фосфатних руд, калійних солей, органічних компонентів). На цьому етапі забезпечується однорідність вихідної сировини, що впливає на рівномірність розподілу поживних елементів у готовому продукті. Для біодобрих включається культивування мікроорганізмів і адаптація їх до ґрунтових умов.

Хімічну обробку, яка забезпечує формування стабільних хімічних комплексів і максимальну доступність поживних речовин для рослин. Для азотних добрив це включає синтез аміаку та подальше отримання карбаміду, аміачної селітри чи КАС. Фосфорні добрива виробляються шляхом кислотної обробки фосфатних руд для отримання розчинних форм фосфору, а калійні – із застосуванням процесів розчинення, кристалізації та грануляції калійних солей.

Грануляцію та агломерацію, що дозволяє формувати частки добрива заданого розміру та механічної міцності. Гранулювання забезпечує рівномірне внесення добрив, зменшує пиління та втрати під час транспортування, а також підвищує зручність зберігання та застосування. Агломерація дрібних часток із застосуванням зв'язуючих матеріалів підвищує щільність і стабільність продукту.

Сушіння та охолодження, що дозволяє довести вологість гранул до оптимального рівня, стабілізувати фізико-хімічні та біологічні властивості продукту та забезпечити його тривалий термін придатності. Контроль температурного режиму на цих стадіях критично важливий для збереження поживних елементів і активності мікроорганізмів у біодобривах.

Пакування та підготовку до транспортування, де готовий продукт упаковується у мішки, біорозкладні або перероблювані пакети, бункери та

інші контейнери. Це дозволяє зберегти якість добрив під час зберігання та перевезення, а також забезпечує зручність і безпечність внесення у ґрунт.

Важливою особливістю сучасного виробництва є специфічність технологічних ланцюгів для різних груп добрив: азотні, фосфорні, калійні та комплексні добрива мають індивідуальні технологічні маршрути, що враховують хімічну природу компонентів, їх фізичні властивості та вимоги до кінцевого продукту. Саме від точності цих схем залежить ефективність дії добрив та їх агрохімічні характеристики.

Впровадження систем автоматизованого контролю та сучасного обладнання дозволяє підтримувати стабільність характеристик готової продукції, регулювати критичні параметри процесу в реальному часі та мінімізувати відхилення від технологічних норм. Це підвищує економічну ефективність виробництва, зменшує втрати сировини та енергоресурсів, а також забезпечує екологічну безпеку, знижуючи негативний вплив на ґрунтові, водні та атмосферні екосистеми.

Таким чином, системний підхід до формування технологічних схем виробництва мінеральних добрив дозволяє отримувати високоякісну продукцію з оптимальною концентрацією поживних елементів, підвищує ефективність використання добрив рослинами та сприяє сталому розвитку агропромислового комплексу.

Технологічні схеми виробництва мінеральних добрив мають багатоступеневу структуру і включають підготовку сировини, хімічну обробку, грануляцію та упаковку.

Різні групи добрив (азотні, фосфорні, калійні, комплексні) мають специфічні технологічні ланцюги, що визначають їх ефективність і якість. Використання автоматизованих систем контролю та сучасного обладнання підвищує стабільність характеристик готової продукції та забезпечує економічну і екологічну ефективність виробництва.

## 2 АНАЛІЗ СУЧАСНИХ ТЕХНОЛОГІЙ ВИРОБНИЦТВА АЗОТНИХ, ФОСФОРНИХ ТА КОМПЛЕКСНИХ ДОБРІВ

Для забезпечення нормального росту, розвитку та продуктивності рослин критично необхідне надходження макро- та мікроелементів у ґрунт у доступній для кореневої системи формі. Макроелементи, що вносяться у відносно великих кількостях, включають азот (N), фосфор (P), калій (K), кальцій (Ca), магній (Mg), залізо (Fe) та сірку (S). Вони беруть участь у формуванні основних структурних та функціональних компонентів рослин, регулюють обмін речовин і підтримують фізіологічну активність. Мікроелементи, необхідні у менших концентраціях, включають бор (B), йод (I), цинк (Zn), молібден (Mo), марганець (Mn), мідь (Cu), кобальт (Co) та інші. Незважаючи на їхню низьку концентрацію, вони виконують критично важливі функції як коферменти ферментів та учасники біохімічних реакцій, що забезпечують розвиток рослини.

Азот є ключовим компонентом білкових сполук, нуклеїнових кислот та хлорофілу, тому його дефіцит безпосередньо обмежує синтез білків та процес фотосинтезу, призводячи до уповільнення росту та зниження врожайності. Фосфор відіграє центральну роль у процесах енергетичного обміну (АТФ), у складі фосфоліпідів формує мембрани клітин, а також забезпечує розвиток кореневої системи і підвищує стійкість рослин до стресових умов. Калій регулює водний баланс, підтримує осмотичний тиск у клітинах та активує численні ферменти, що беруть участь у синтезі вуглеводів та білків [26].

Кальцій забезпечує стабільність клітинних стінок та міжклітинних контактів, сприяє нормальному поділу клітин і росту тканин, а магній є центральним атомом у молекулі хлорофілу, без якого фотосинтез неможливий. Залізо входить до складу багатьох ферментів, що регулюють синтез хлорофілу та процеси дихання, тоді як сірка є складовою амінокислот (цистеїн, метіонін) та вітамінів, що забезпечує формування білкових структур і активність ферментів.

Мікроелементи, хоча й потрібні у менших кількостях, критично важливі для нормальної фізіології рослин. Бор регулює поділ і диференціацію клітин, а також впливає на транспорт цукрів і розвиток репродуктивних органів. Цинк і мідь виконують функцію коферментів у багатьох окислювальних та відновних реакціях, молібден необхідний для активності нітрогеназ і ферментів нітратного обміну, марганець бере участь у фотосинтетичних процесах та синтезі хлорофілу, а кобальт важливий для розвитку симбіотичних азотфіксуючих бактерій.

Регулярне внесення макро- і мікроелементів у ґрунт дозволяє підтримувати його родючість, запобігати виснаженню природних ресурсів і забезпечує стабільне отримання високих урожаїв. Добрива, що містять один або кілька життєво необхідних елементів, називають мінеральними, і їх використання спрямоване на оптимізацію поживного балансу ґрунту та підвищення продуктивності сільськогосподарських культур.

Комплексне та збалансоване застосування макро- та мікродобрих забезпечує інтеграцію фізіологічних, біохімічних і агрохімічних процесів, що є основою сталого ведення сільського господарства та збереження екологічної рівноваги.

## 2.1 Технологія виробництва фосфатних добрив

Фосфорні добрива являють собою мінеральні сполуки, що містять фосфор і забезпечують його надходження до рослин у формі  $P_2O_5$ . Фосфор стимулює синтез хлорофілу, жирів та вітамінів, що є ключовими процесами для росту та розвитку рослин [26].

Основні типи фосфорних добрив, методи їхнього отримання та основні характеристики наведені в таблиці 2.1.

Таблиця 2.1 – Основні типи фосфорних добрив, методи їхнього отримання та основні характеристики

Тип добрива	Основна форма фосфору (P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> )	Засвоюваність для рослин	Метод отримання	Форма випуску	Примітки
Прості суперфосфати	Водорозчинна	Висока	Обробка фосфоритів або апатитів сірчаною кислотою	Гранули, порошок	Легко доступні рослинам
Подвійні суперфосфати	Водорозчинна, концентрована	Висока	Камерно-поточковий, обертові камери	Гранули, порошок	Вища якість, кращий ефект
Преципітат	Засвоювана (через кислотність ґрунту)	Середня	Обробка фосфоритів фосфорною кислотою	Порошок	Поступове засвоєння рослинами
Термофосфат	Засвоювана	Середня	Термообробка фосфоритів	Порошок	Під дією ґрунтових кислот переходить у розчинну форму
Фосфорити, апатити, кісткове борошно	Нерозчинна	Низька	Дроблення, подрібнення	Порошок	Часткове засвоєння при тривалому внесенні

За ступенем розчинності та доступності для рослин фосфорні добрива поділяють на три групи [27]:

– водорозчинні – до них відносяться простий та подвійний суперфосфат, які безпосередньо доступні для засвоєння рослинами;

– засвоювані – преципітат та термофосфат, які під дією кислот ґрунту переходять у розчинну форму і стають доступними для рослин;

– нерозчинні – фосфорити, апатити, кісткове борошно; їхні фосфорні солі важко засвоюються рослинами та не розчиняються у воді, проте при тривалому перебуванні в ґрунті частина фосфору все ж засвоюється.

Сировинною базою для виробництва фосфорних добрив є природні апатити та фосфорити, які обробляються різними хімічними методами. Промисловість випускає простий і подвійний суперфосфат у вигляді гранул або порошку сірувато-білого кольору. Простий суперфосфат отримують шляхом обробки апатитів або фосфоритів сірчаною кислотою, тоді як подвійний суперфосфат виробляють аналогічним чином із застосуванням різних технологічних схем, таких як обертові камери, камерно-потоківі або безкамерні методи [27].

Камерно-потоківий метод виробництва подвійного суперфосфату має низку переваг у порівнянні з класичними способами: він використовує стандартне типове устаткування, забезпечує високий рівень інтенсивності процесу та дозволяє отримувати продукт високої якості з покращеними агрохімічними властивостями. У структурі собівартості виробництва суперфосфату найбільшу частку (від 93 до 96 %) займає вартість сировини, що характерно для більшості мінеральних добрив. Гранульований подвійний суперфосфат має вищу собівартість порівняно з порошкоподібним, однак гранулювання значно покращує його якість, полегшує транспортування та внесення у ґрунт.

Сучасне вдосконалення технологій виробництва фосфорних добрив передбачає не лише розширення сировинної бази, а й реконструкцію підприємств, що випускають екстракційну фосфорну кислоту та суперфосфат, а також більш повне використання виробничих відходів. Це дозволяє зменшувати втрати цінних поживних елементів і підвищувати ефективність технологічного процесу.

Калій є одним із ключових макроелементів, необхідних для інтенсивного фотосинтезу, росту та розвитку вегетативної маси, формування міцного стебла, підвищення цукристості та інтенсивності аромату плодів. Для удобрення ґрунтів у промисловості використовують різноманітні калійні сполуки: хлориди, сульфати, карбонати та інші солі калію. 90 % виробництва калійних добрив припадає на хлорид калію (KCl), який добувають із

сильвінітових руд (KCl + NaCl) шляхом розчинення з подальшою роздільною кристалізацією або методом флотації.

Сильвінітові руди із вмістом калію від 22 до 25 % не можуть використовуватися без попередньої обробки як ефективне добриво. Тому для виробництва концентрованих калійних продуктів руди піддають збагаченню механічними та хімічними методами, серед яких особливе значення мають флотація та галургія. Флотація, як сучасний прогресивний метод, базується на різній змочуваності мінеральних компонентів руди. Подрібнені частки утворюють пульпу – суспензію твердих часток у рідині. При додаванні флотореагентів частки, що гірше змочуються, піднімаються на поверхню разом із бульбашками повітря у вигляді піни, яка збирається як рудний концентрат, тоді як добре змочувані залишаються в пульпі як флотаційні хвости.

Метод розчинення сильвініту з подальшою кристалізацією ґрунтується на різниці розчинності KCl і NaCl при зміні температури. Цей процес потребує значних енергетичних витрат і спричиняє підвищену корозію обладнання у гарячих розчинах. Серед напрямів модернізації виробництва калійних добрив – розширення випуску безхлорних форм, які сприяють підвищенню врожайності та якості продукції сільськогосподарських культур, а також отримання гранульованих і крупнокристалічних калійних добрив з вмістом KCl не менше 96 %, що забезпечує високу ефективність використання.

Поряд із фосфорними та калійними елементами, азот належить до ключових макроелементів, які визначають інтенсивність росту рослин, формування вегетативної маси та продуктивність сільськогосподарських культур. Азот входить до складу білкових сполук, нуклеїнових кислот, хлорофілу та ряду коферментів, що забезпечують життєві процеси рослини. Його дефіцит проявляється уповільненням росту, зниженням врожайності та погіршенням якості продукції.

## 2.2 Технологічні процеси виробництва азотних добрив

Виробництво азотних добрив здійснюється на основі різноманітних технологічних процесів, що дозволяють отримувати сполуки з високим вмістом доступного для рослин азоту та оптимальними фізико-хімічними властивостями. До основних видів азотних добрив належать аміачна селітра, карбамід, сульфат амонію та комплексні продукти на їхній основі.

Виробничі методи включають синтез аміаку з атмосферного азоту та водню за Haber-Bosch, подальше його перетворення у нітратні або амідні форми та грануляцію добрив для покращення умов зберігання, транспортування і внесення у ґрунт.

Сучасні підходи до виробництва азотних добрив передбачають підвищення енергоефективності процесів, зниження втрат азоту при переробці та внесенні, а також розробку модифікованих форм із контрольованим вивільненням азоту. Це дозволяє не лише підвищити агрохімічну ефективність добрив, а й зменшити негативний вплив на навколишнє середовище, зокрема знизити ризик викидів аміаку та нітратів у ґрунтові води.

Азотні добрива належать до ключових компонентів сучасного землеробства, забезпечуючи рослини одним із основних елементів живлення – азотом. Від ефективності їх застосування залежить не тільки врожайність, але й родючість ґрунтів. Азот є структурним елементом білків, хлорофілу та нуклеїнових кислот (ДНК і РНК), що робить його критично необхідним для нормального росту та розвитку рослин. Природні запаси доступного азоту в ґрунті часто обмежені, особливо на інтенсивно використовуваних сільськогосподарських угіддях, що робить застосування азотних добрив незамінним для підтримки високих урожаїв [27].

За даними FAO, близько 50 % світового виробництва продовольства залежить від використання азотних добрив, що підкреслює їхню фундаментальну роль у глобальному забезпеченні харчовими продуктами.

Класифікація азотних добрив:

Азотні добрива поділяються на декілька основних груп залежно від хімічної природи, фізичних властивостей та концентрації активного компонента:

Аміачна селітра (нітрат амонію,  $\text{NH}_4\text{NO}_3$ ). Вміст азоту: від 34 до 35 %. Високоєфективне універсальне добриво для більшості сільськогосподарських культур; вибухонебезпечне, що потребує спеціальних умов зберігання та транспортування.

Сечовина (карбамід,  $\text{CO}(\text{NH}_2)_2$ ). Вміст азоту: до 46 %. Концентроване добриво, повільне вивільнення азоту забезпечує тривале живлення рослин, зручне у застосуванні.

Безводний аміак ( $\text{NH}_3$ ). Вміст азоту: до 82 %. Рідкий газоподібний добривний засіб, що вноситься в ґрунт спеціалізованою технікою.

Рідкі азотні розчини (наприклад, КАС – комплекс аміачної селітри).

Поєднують різні форми азоту в рідкому вигляді; зручні для точного й економічного внесення.

Усі ці добрива безпосередньо походять від аміаку, що є базовим проміжним продуктом у виробництві азотних добрив.

Технологія виробництва азотних добрив:

Синтез аміаку (процес Габера–Боша). Азот із повітря не засвоюється рослинами напряму. Для його використання у сільському господарстві необхідно перевести у хімічно активну форму.

Цього досягають синтезом аміаку, який здійснюється шляхом взаємодії азоту ( $\text{N}_2$ ) з воднем ( $\text{H}_2$ ) під високим тиском (від 150 до 300 атм) та високою температурою (від 400 до 500 °С) у присутності каталізатора (зазвичай заліза).

Водень найчастіше отримують із природного газу, вугілля або води (таблиця 2.2).

Таблиця 2.2 – Сировина та енергетичні ресурси

Компонент	Джерело	Особливості
Азот (N <sub>2</sub> )	Повітря	Отримують шляхом розділення повітря на азот та кисень
Водень (H <sub>2</sub> )	Природний газ, вугілля, вода	Найчастіше застосовують метан через економічну доцільність
Енергія	Газ, вугілля, електрика	Виробництво азотних добрив енергоємне; до 1 % світової енергії витрачається на синтез аміаку

Отримання нітратної кислоти (HNO<sub>3</sub>). Для виробництва нітратних добрив аміак окиснюють до оксиду азоту (NO) і далі взаємодією з водою утворюють нітратну кислоту. Ця кислота використовується для синтезу аміачної селітри.

Виробництво кінцевих продуктів. Аміачна селітра: нейтралізація аміаку нітратною кислотою, випарювання та гранулювання.

Сечовина: реакція аміаку з CO<sub>2</sub> під високим тиском з утворенням гранул карбаміду.

Безводний аміак: охолодження та зрідження без додаткових реакцій.

Азотні добрива забезпечують підвищення врожайності, але їх виробництво й використання пов'язані з низкою екологічних викликів, а саме: високий вуглецевий слід виробництва аміаку та інших азотних сполук; ризик забруднення ґрунтових і поверхневих вод нітратами при надмірному внесенні; зміни біогеохімічних циклів азоту в агроєкосистемах [28].

Оптимізація технологій синтезу, точне дозування та впровадження безпечних методів внесення дозволяють мінімізувати негативний вплив на довкілля, підвищуючи ефективність і сталий розвиток сільського господарства.

### 2.3 Технології отримання комплексних добрив (NPK, NP, PK)

Комплексні мінеральні добрива, що містять два або три основні макроелементи (азот, фосфор та калій), є одним із ключових засобів забезпечення збалансованого живлення рослин. Використання таких добрив дозволяє одночасно забезпечити рослини необхідними поживними речовинами, що позитивно впливає на їх фізіологічний стан, інтенсивність фотосинтезу, ріст вегетативної маси та розвиток кореневої системи.

Застосування комплексних добрив сприяє підвищенню врожайності сільськогосподарських культур за рахунок синергетичного ефекту взаємодії макроелементів. Азот стимулює утворення білкових сполук та хлорофілу, фосфор активізує енергетичний обмін та розвиток кореневої системи, а калій регулює водний баланс, осмотичний тиск та активує ферментативні процеси, що визначають синтез цукрів і білків. Така комплексна дія елементів забезпечує більш повне та ефективне використання внесених добрив у порівнянні з моноелементними продуктами, дозволяє зменшити втрати поживних речовин при вимиванні та ерозії ґрунту і підвищує економічну ефективність виробництва сільськогосподарської продукції.

Найпоширенішими формами комплексних добрив є:

NPK (азот-фосфор-калій) – містять три основні макроелементи, які забезпечують повний спектр життєво важливих процесів у рослині. Їх застосування доцільне на більшості типів ґрунтів та для широкого спектру культур, оскільки вони одночасно впливають на ріст, розвиток та плодоношення рослин.

NP (азот-фосфор) – включають два макроелементи, що ефективно використовуються для стимуляції росту вегетативної маси та розвитку кореневої системи, особливо на ґрунтах із недостатнім вмістом фосфору.

PK (фосфор-калій) – містять фосфор і калій, і застосовуються переважно на ранніх етапах розвитку рослин, а також для підживлення плодкових культур,

овочів та технічних культур, коли потреба в азоті вже забезпечена іншими джерелами.

Комплексні добрива випускаються у різних фізичних формах: гранульовані, порошкоподібні або в рідкому вигляді. Гранульовані добрива забезпечують зручність транспортування, рівномірність внесення та зниження пиління під час механізованого внесення. Порошкоподібні форми більш мобільні у технологічному процесі виробництва, проте потребують точного дозування при внесенні. Рідкі форми комплексних добрив дозволяють здійснювати позакореневе підживлення та точне регулювання дозування поживних елементів залежно від потреб рослин у конкретні періоди росту.

Одним із визначальних чинників ефективності застосування комплексних мінеральних добрив є науково обґрунтоване співвідношення основних макроелементів у їх складі. Баланс азоту, фосфору та калію має формуватися з урахуванням біологічних особливостей конкретної сільськогосподарської культури, типологічних характеристик ґрунту, рівня його забезпеченості поживними речовинами, а також прийнятої системи землеробства й агротехнічних заходів. Коректно підібрана пропорція N:P:K забезпечує оптимальні умови для росту і розвитку рослин, підвищує інтенсивність фізіологічних процесів та сприяє формуванню високих урожаїв з покращеними якісними показниками.

Дотримання збалансованого співвідношення макроелементів має також важливе екологічне значення. Надмірне внесення окремих елементів, передусім азоту або фосфору, може спричинити їх накопичення в ґрунтовому профілі, що негативно позначається на кислотно-лужній рівновазі, структурному стані ґрунту та активності мікробіоти. Така диспропорція здатна призвести до посилення процесів вимивання поживних речовин у глибші горизонти чи у водні об'єкти, підвищення осмотичного тиску у ґрунтовому розчині та виникнення вторинних екологічних ризиків, зокрема евтрофікації водойм.

Сформований з урахуванням наукових рекомендацій баланс N:P:K забезпечує не лише ефективне живлення рослин, а й підтримання стабільності агроecosистеми. Раціональне використання комплексних добрив сприяє збереженню фізико-хімічних властивостей ґрунту, стабілізації його структурно-агрегатного стану та підтриманню оптимального рівня біологічної активності, що є ключовою передумовою довготривалої родючості.

Відповідно ключовим аспектом використання комплексних добрив є правильне співвідношення макроелементів у складі продукту, яке визначається потребами конкретної культури, типом ґрунту та агротехнічними умовами. Оптимальна пропорція N:P:K дозволяє не лише підвищити врожайність та якість продукції, а й запобігти надлишковому накопиченню окремих елементів у ґрунті, що може призвести до порушення його фізико-хімічних властивостей та екологічних ризиків [28].

У таблиці 2.3 наведені основні типи комплексних добрив, їхні склади та характеристики, що відображають оптимальне співвідношення макроелементів і визначають ефективність їх використання у різних агротехнічних системах.

Таблиця 2.3 – Основні типи комплексних добрив та їх характеристики

Тип добрива	Склад (N:P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> :K <sub>2</sub> O, %)	Форма випуску	Особливості застосування
НПК	15:15:15, 16:16:16, 12:24:12	Гранули, порошок	Універсальне збалансоване добриво для більшості культур
NP	16:20:0, 12:24:0	Гранули, порошок	Для удобрення ґрунтів із високим вмістом калію; стимулює розвиток кореневої системи
PK	0:20:20, 0:18:18	Гранули, порошок	Використовують на азотно насичених ґрунтах

Таким чином, комплексні мінеральні добрива є важливим інструментом інтегрованого живлення рослин, що забезпечує збалансоване надходження поживних речовин, підвищує ефективність використання земельних ресурсів та сприяє отриманню стабільних високих урожаїв при мінімізації екологічного навантаження на ґрунтові та водні екосистеми.

Комплексні мінеральні добрива можуть бути отримані різними технологічними підходами, серед яких основними є механічне змішування, хімічна реакція (хімічний синтез) та комбіновані технології, що включають гранулювання і агломерацію. Вибір конкретного методу залежить від необхідного складу добрива, фізико-хімічних властивостей компонентів, вимог до розмірів гранул та умов застосування продукту.

Механічне змішування є найпростішим та найпоширенішим методом отримання комплексних добрив. Суть процесу полягає у рівномірному змішуванні готових моноелементних добрив – амонійної селітри, суперфосфату та хлористого калію – у заданому співвідношенні відповідно до потреб конкретної культури та типу ґрунту. Під час цього процесу важливо забезпечити однорідність суміші, яка визначає рівномірність внесення поживних речовин у ґрунт [29].

Переваги механічного змішування полягають у його простоті, низьких капітальних витратах на устаткування та невисокій енергомісткості процесу. Однак метод має і певні обмеження: гранули можуть бути неоднорідними за фізичними параметрами, що підвищує ризик їх розділення під час транспортування та зберігання. Крім того, у суміші можуть відбуватися хімічні взаємодії між компонентами, що впливає на стабільність продукту та доступність поживних елементів для рослин.

Хімічні методи виробництва передбачають безпосереднє формування хімічних комплексів у процесі взаємодії компонентів. Завдяки цьому підходу досягається висока ступінь однорідності продукту, забезпечується максимальна доступність елементів для рослин та оптимізується хімічний склад добрива. Такі методи дозволяють отримувати продукти із заданим

співвідношенням макро- та мікроелементів, що важливо для створення спеціалізованих комплексних добрив для різних сільськогосподарських культур.

Комбіновані технології, що поєднують механічне змішування, хімічний синтез, гранулювання та агломерацію, дозволяють підвищити стабільність продукту під час зберігання та транспортування, оптимізувати фізико-хімічні властивості а також забезпечити зручність у застосуванні. Гранулювання та агломерація дозволяють формувати гранули з заданим діаметром і міцністю, що знижує пиління та втрати продукту при внесенні у ґрунт. Крім того, гранульовані добрива характеризуються більш рівномірним розподілом поживних речовин, що сприяє ефективнішому засвоєнню їх рослинами.

Таким чином, вибір технологічного методу виробництва комплексних добрив визначається як економічними, так і агрохімічними критеріями. Механічне змішування є найбільш доступним та економічним, хімічні методи дозволяють підвищити біодоступність поживних елементів, а комбіновані технології забезпечують оптимальне поєднання фізико-хімічних властивостей, стабільності продукту та зручності його використання у сільському господарстві.

При суперфосфато-аміачному синтезі суміш аміачної води і суперфосфату під високим тиском та температурою утворює гранульовані NPK-добрива.

Синтез суперфосфату-аміаку включає подачу аміачної води і суперфосфату в умовах підвищеного тиску і температури, що призводить до утворення гранульованих добрив NPK. Кислотна грануляція передає реакцію, що містить фосфорну або амофосну кислоту і аміаком за участю калію, в результаті чого гранули розчиняються.

Солюбілізація перед обробкою харчових продуктів калієм, а також фосфорними кислотами і водними розчинами, що підвищує їх чистоту у воді в харчовому відношенні. Передачі цього процесу включають в себе високу ступінь однорідності продукту, здатність до поступального або швидкого

шліфування поживних речовин рослин і можливість створення гранул такого складу і розкиду. Однак цей метод може бути недовгим, так як гнучкість необробленого обладнання означає нестачу енергії, а також неможливість контролювати температуру і вологість.

Комбіновані технології поєднують механічне змішування та хімічне агломерування. Наприклад, механічно змішують азотну, фосфорну та калійну сировину. Вологу суміш гранулюють у барабанних грануляторах або на плоских столах. Гранули сушать і охолоджують для отримання готового продукту. Такі технології дозволяють отримувати високоякісні гранульовані комплексні добрива, які зручні для транспортування та застосування в агроценозах.

Основні етапи виробництва гранульованого NPK-добрива:

Підготовчий етап передбачає подрібнення та точне дозування азотних, фосфорних і калійних компонентів, що забезпечує необхідну однорідність сировинної маси. Подальше механічне змішування сприяє рівномірному розподілу мінеральних складових у суміші та формуванню стабільної структури майбутнього продукту.

На стадії гранулювання, що здійснюється у барабанних або ротаційних грануляторах, утворюються гранули заданого діаметра та щільності.

Після цього гранульований матеріал проходить сушіння та охолодження, в результаті чого досягається оптимальний рівень вологості та підвищується механічна міцність гранул.

Заключний етап включає сортування та пакування готового добрива у тару, придатну для транспортування та подальшого використання.

Комплексні добрива характеризуються низкою переваг: вони забезпечують збалансоване забезпечення рослин елементами живлення в межах однієї гранули; зменшують потребу у використанні окремих моноелементних добрив; спрощують логістику та процес внесення; сприяють підвищенню коефіцієнта використання поживних речовин і зменшують їхні втрати внаслідок вимивання з ґрунтового профілю [29].

### 3 УДОСКОНАЛЕННЯ ТЕХНОЛОГІЇ ВИРОБНИЦТВА ЕКОЛОГІЧНО БЕЗПЕЧНОЇ СИСТЕМИ УДОБРЕННЯ

Сьогодні підвищення ефективності використання мінеральних добрив розглядається як один із ключових напрямів удосконалення систем удобрення та інтенсифікації сільськогосподарського виробництва. Це пов'язано з необхідністю забезпечення збалансованого живлення рослин, підвищення продуктивності культур та оптимізації використання земельних і виробничих ресурсів у контексті принципів сталого розвитку аграрного сектору.

Одним із основних завдань сучасної системи удобрення є збільшення коефіцієнта засвоєння поживних елементів рослинами, що дозволяє максимально використовувати внесені азот, фосфор і калій та знижує потребу у повторних підживленнях. Високий рівень засвоєння поживних речовин забезпечує не лише зростання врожайності та поліпшення якості продукції, а й сприяє зменшенню економічних витрат на придбання та внесення добрив.

Окрему увагу приділяють зниженню втрат макроелементів у процесі внесення. Втрата азоту через випаровування аміаку, нітратне вимивання та денітрифікацію є однією з основних причин неефективного використання азотних добрив. Подібним чином фосфор і калій можуть частково залишатися в нерозчинних формах або вимиватися з ґрунту, що призводить до зниження родючості та погіршення агрохімічного стану земель. Використання інноваційних технологій – таких як добрива з контрольованим вивільненням, інгібітори уреаз, комплексні та гранульовані форми – дозволяє значно зменшити втрати поживних елементів та підвищити ефективність їх засвоєння рослинами.

Важливим аспектом є також мінімізація негативного впливу на навколишнє середовище, що включає запобігання забрудненню ґрунтових і поверхневих вод, зменшення викидів шкідливих газів і підтримання екологічної стабільності агроєкосистем. У цьому контексті розробка та впровадження екологічно безпечних технологій внесення мінеральних

добрив, інтеграція біологічних компонентів у системи удобрення та оптимізація норм внесення є критично важливими для досягнення сталого розвитку сільського господарства.

Таким чином, сучасна науково-обґрунтована система удобрення повинна забезпечувати баланс між максимізацією агрономічного ефекту, економічною доцільністю та екологічною безпекою, що є пріоритетним завданням у контексті глобальних тенденцій інтенсивного і водночас сталого використання природних ресурсів.

Підвищення результативності застосування мінеральних добрив сьогодні вважається одним із основних напрямів удосконалення систем удобрення. З огляду на тенденції сталого розвитку, головне завдання полягає у збільшенні коефіцієнта засвоєння поживних елементів рослинами, зменшенні втрат азоту, фосфору та калію, а також мінімізації негативного впливу на довкілля.

### 3.1 Розробка технологічної схеми виробництва екологічно безпечного добрива

Розроблення технологічної схеми виробництва екологічно безпечного добрива потребує комплексного підходу, що включає послідовний добір сировини, проведення хімічних та біотехнологічних обробок, формування гранул, їх сушіння, охолодження та подальше пакування. Основною метою є досягнення високої ефективності використання поживних елементів і водночас мінімізація впливу виробництва та застосування добрив на довкілля.

Підготовка сировини. На цьому етапі здійснюють вибір та підготовку компонентів – азотних, фосфорних, калійних і органічних. Сировину подрібнюють, просіюють і очищують для забезпечення рівномірності майбутнього гранульованого продукту та усунення сторонніх домішок. Для біодобрив окремо готують мікроорганізми, що адаптовані до певних ґрунтово-кліматичних умов [30].

Хімічна та біотехнологічна обробка. Азотні компоненти можуть проходити нітраційну обробку, фосфорні – кислотну або ферментаційну, а калійні – очищення від домішок.

У разі виробництва біодобрив проводять культивування мікроорганізмів, які здатні фіксувати азот, мобілізувати фосфор та сприяти розкладанню органічних речовин, що дозволяє знизити необхідність застосування традиційних мінеральних добрив.

Гранулювання. Формування гранул здійснюється сухим або вологим способом – вибір залежить від необхідних властивостей добрива.

Вологе гранулювання забезпечує більш рівномірні та міцні гранули, тоді як сухе є економічнішим і забезпечує добру зберіганість продукту. Для добрив із контрольованим вивільненням поживних елементів гранули додатково покривають захисними мінеральними або біополімерними оболонками.

Сушіння та охолодження. Сушіння проводять з урахуванням температурного режиму, щоб запобігти втраті активності мікроорганізмів у біодобривах та забезпечити стабільність гранул. Після сушіння продукт охолоджують, що запобігає злежуванню та сприяє збереженню оптимальної вологості перед фасуванням.

Пакування та зберігання. Готове добриво упаковують у тару, яка забезпечує захист від зовнішніх впливів і зберігає його фізико-хімічні та біологічні властивості. Для продукції екологічного спрямування перевагу надають пакувальним матеріалам, що підлягають переробці або біологічному розкладанню.

Технологічна схема виробництва. Сукупність описаних процесів, що формує логічно впорядковану технологічну послідовність, наведена на рисунку 3.1.

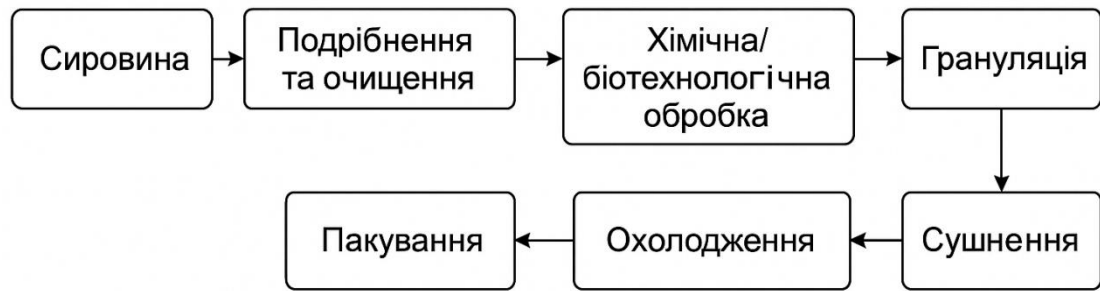


Рисунок 3.1 – Технологічна схема виробництва екологічно безпечного добрива

Наприклад, для виробництва NPK-20:10:10 з біодобавкою використовують:  $\text{NH}_4\text{NO}_3$  – 400 кг/т гранул, суперфосфат – 250 кг/т гранул, KCl – 350 кг/т гранул,

Мікробіологічний компонент (азотофіксуючі бактерії) – 5 кг/т гранул.

Схема передбачає контроль усіх технологічних параметрів: температура, вологість, тривалість реакцій, що забезпечує стабільну якість та екологічну безпеку добрива.

У процесі виконання практичної частини кваліфікаційної роботи нами було проведено аналіз сучасних підходів до екологічно безпечного удобрення та виконано низку досліджень на базі кафедри технологій неорганічних речовин. Метою роботи було визначення оптимальних технологічних рішень, які дозволяють підвищити ефективність живлення рослин і водночас зменшити негативний вплив добрив на довкілля.

Інтегровані системи удобрення. У ході проведених досліджень була сформована модель інтегрованого удобрення, що поєднує використання мінеральних добрив і органічних сполук природного походження. Поєднання комплексного NPK-добрива з формулою 16:16:16 та розчину гумату натрію продемонструвало виражений синергетичний ефект: коефіцієнт засвоєння фосфору зріс у середньому від 8 до 12 %. Таке підвищення доступності фосфору пояснюється тим, що гумінові речовини сприяють мобілізації фосфатів у ґрунтовому розчині та поліпшують умови для їхньої дифузії до кореневої системи.

Під час лабораторної роботи було проведено визначення кислотності ґрунтових зразків після внесення різних норм органо-мінеральних композицій. У всіх варіантах досліджу показник рН зберігався в межах нейтрального значення, що підтверджує відсутність підкислювального ефекту та свідчить про екологічну безпечність запропонованої системи удобрення.

Біодобрива та мікробні препарати. Окремим напрямом роботи було вивчення ефективності біодобрив, створених на основі азотфіксуючих мікроорганізмів роду *Azotobacter*. Інокуляція ґрунтових зразків мікробними препаратами дала змогу оцінити життєздатність та інтенсивність колонізації. Кількісний облік активних колоній засвідчив, що застосування біодобрив дозволяє зменшити норму внесення мінерального азоту від 30 до 35 %. Ефект зумовлений прямою біологічною фіксацією атмосферного азоту й одночасним поліпшенням мікробіологічної активності ґрунту, що сприяє стабілізації азотного балансу [30].

Пролонговані добрива. У межах дослідження були виготовлені експериментальні гранули NPK-добрив із біополімерною захисною оболонкою на основі крохмалю. Таке покриття створює бар'єр, що регулює швидкість переходу поживних речовин у ґрунтовий розчин. Динаміка вивільнення азоту визначалась шляхом періодичних відборів проб розчину протягом місяця. Отримані результати свідчать, що азотовмісна складова надходить у доступну форму рівномірно протягом від 25 до 30 днів, що суттєво знижує ризик непродуктивних втрат і забезпечує сталість живлення рослин.

Використання органічних відходів. Перспективність альтернативних органічних ресурсів оцінювалась на прикладі дигестату – залишкового продукту переробки біомаси у біогазових установках. Лабораторний аналіз показав достатньо високий вміст макроелементів: азоту – від 2,1 до 2,5 %, калію – до 1,2 %. Ці значення дають можливість розглядати дигестат як повноцінне органо-мінеральне добриво, придатне для основного удобрення зернових культур.

Додатково було оцінено збереження поживних речовин під час 30-денного зберігання. Встановлено, що концентрація доступних елементів залишається стабільною, що підтверджує придатність дигестату до тривалого використання без втрати агрохімічної цінності.

Точне землеробство. За допомогою комп'ютерного моделювання була побудована карта просторового розподілу калію та фосфору на дослідній площі 1 га. Застосування інструментів просторового аналізу дало змогу визначити неоднорідність забезпеченості ґрунту поживними елементами та виділити зони з різною потребою у внесенні добрив. Практичні розрахунки показали, що використання систем точного внесення дозволяє скоротити застосування добрив у середньому на від 15 до 20 % без зниження продуктивності, завдяки оптимальному розподілу ресурсів і мінімізації надлишкового удобрення.

Зменшення втрат азоту. З метою оцінки ефективності інгібіторів уреаз було проведено порівняльне дослідження традиційного карбаміду та карбаміду, модифікованого інгібітором NBPT.

Вимірювання показали, що застосування інгібованої форми знижує втрати азоту у вигляді аміаку приблизно на 40 %. Такий результат пов'язаний з уповільненням гідролізу сечовини, що забезпечує пролонговане утворення доступних форм азоту та підвищує коефіцієнт його використання рослинами.

Біоорієнтовані методи. У межах роботи окрему увагу приділено дослідженню впливу біочару (активованого деревного вугілля) на фізичні та хімічні властивості ґрунту.

Внесення біочару підвищило водоутримуючу здатність ґрунту на 12 %, а також сприяло зростанню вмісту органічного вуглецю. Це зумовлено високою пористістю матеріалу та його здатністю стабілізувати органічну речовину.

Отримані дані підтверджують перспективність біочару як додаткового компонента екологічно орієнтованих систем удобрення (табл. 3.1).

Таблиця 3.1 – Результати досліджень щодо екологічно безпечних систем удобрення

№	Напрямок дослідження	Основні результати	Екологічний ефект
1	Інтегроване удобрення	Підвищення засвоєння фосфору від 8 до 12 %	Зниження кислотності ґрунту
2	Біодобрива	Зменшення потреби в N-добривах на 35 %	Менше викидів N <sub>2</sub> O
3	Пролонговані добрива	Рівномірне вивільнення азоту протягом 30 днів	Зменшення втрат через вимивання
4	Дигестат	Високий вміст NPK, стабільність при зберіганні	Використання відходів енергетики
5	Точне землеробство	Економія добрив від 15 до 20 %	Оптимізація дозування
6	Інгібітори уреаз	Зменшення випаровування NH <sub>3</sub> на 40 %	Зниження газових втрат азоту
7	Біочар	Зростання вологості ґрунту на 12 %	Підвищення родючості та фіксація вуглецю

У результаті проведених досліджень було обґрунтовано доцільність впровадження екологічно безпечних систем удобрення, що базуються на поєднанні мінеральних, біологічних і органічних методів.

### 3.2 Вибір та розрахунок основного технологічного обладнання

Вибір та точний розрахунок основного технологічного обладнання є критично важливим етапом проектування будь-якого виробництва мінеральних або біологічних добрив. Від правильності цих інженерних рішень залежить не лише продуктивність заводу та якість кінцевої продукції, а й економічна ефективність технологічного процесу, а також екологічна безпека виробництва, що особливо актуально у сучасних умовах сталого розвитку [29].

Обладнання для виробництва різних типів добрив значно відрізняється за призначенням, конструкційними особливостями, матеріалами виготовлення та габаритними параметрами. Це обумовлено специфікою хімічних реакцій, фізико-хімічними властивостями сировини, її агломераційною здатністю, гігроскопічністю, корозійною активністю та умовами проведення технологічних процесів. Основним завданням інженерного проектування є забезпечення стабільного та безпечного функціонування технологічних ланцюгів, що охоплюють підготовку сировини, хімічну обробку, гранулювання, сушіння та пакування готового продукту.

У сучасному виробництві особливу увагу приділяють комплексним добривам та біологічним препаратам, включаючи мікробіологічні інокулянти. Ці продукти потребують специфічного обладнання з високим рівнем контролю параметрів процесу – температури, вологості, рН середовища, концентрації активних компонентів. Ефективність технології визначається не лише правильним підбором матеріалів та об'ємів апаратів, але й продуктивністю агрегатів, умовами експлуатації, рівнем автоматизації та контролем технологічних параметрів у реальному часі.

Метою даного розділу є систематизація науково-інженерних підходів до вибору основного технологічного обладнання для різних видів добрив, розробка методики розрахунку ключових апаратів та надання практичних рекомендацій щодо організації технологічного процесу. Це включає

специфіку виробництва азотних, фосфорних, калійних, комплексних та біологічних добрив із урахуванням їх фізико-хімічних властивостей та вимог до екологічної безпеки.

Технологічний процес виробництва азотних добрив передбачає синтез азотної кислоти або карбаміду, гранулювання, сушіння та підготовку до пакування. Основне технологічне обладнання включає:

Реактор для хімічної реакції – виготовляється з нержавіючої або кислотостійкої сталі, забезпечує стабільні умови синтезу та стійкість до агресивних реагентів.

Гранулятор – використовується для формування гранул заданого розміру та щільності; матеріали конструкції – вуглецева або нержавіюча сталь, стійкі до абразивного зношування.

Сушарка – забезпечує контроль вологості гранул, підтримує фізичні, хімічні та механічні властивості; застосовується сталь з антикорозійним покриттям.

Конвеєри для транспортування сировини та готового продукту – виготовляються із вуглецевої сталі, забезпечують безперервність технологічного процесу.

Вакуумні насосні системи – призначені для подачі та відкачки розчинів; виконуються з кислотостійкої сталі для забезпечення хімічної стійкості та тривалої експлуатації.

Таке комплексне поєднання апаратів і обладнання забезпечує стабільну роботу технологічної лінії, високу продуктивність та точність формування гранул, а також мінімізує втрати азоту та інших поживних елементів у процесі виробництва та транспортування добрив.

Розрахунок обладнання:

Об'єм реактора визначають за формулою 3.1.

$$V = \frac{Q \cdot 10^3}{\rho \cdot 24 \cdot 3600} \cdot \tau \quad (3.1)$$

Де: V – об'єм реактора, м<sup>3</sup>;

$Q$  – продуктивність установки (кількість продукту за добу), т/добу;

$10^3$  – коефіцієнт для переведення тонн у кілограми;

$\rho$  (rho) – густина матеріалу, кг/м<sup>3</sup>;

$24 \times 3600$  – кількість секунд у добі (24 години  $\times$  3600 с);

$\tau$  (tau) – тривалість перебування (час реакції), с.

Масовий потік повітря в сушарці розраховують за формулою 3.2.

$$L = \frac{Q \cdot (W_1 - W_2)}{k \cdot (t_{\text{повітря}} - t_{\text{гранули}})} \quad (3.2)$$

Де:  $L$  – масовий потік повітря, кг/с;

$Q$  – продуктивність (маса матеріалу, що сушиться), кг/с або т/год (залежить від умов задачі);

$W_1$  – початкова вологість матеріалу, %;

$W_2$  – кінцева вологість після сушіння, %;

$k$  – коефіцієнт масообміну (характеристика сушарки), кг/(м<sup>2</sup>·с·°C);

$t_{\text{повітря}}$  – температура повітря, що подається в сушарку;

$t_{\text{гранули}}$  – температура гранул у сушарці.

Продуктивність гранулятора визначають за формулою 3.3.

$$Q_g = \rho_s \cdot V_c \cdot n \quad (3.3)$$

Де:  $Q_g$  – продуктивність гранулятора, тобто кількість гранул, яку апарат може виробити за одиницю часу (кг/год або т/год);

$\rho_s$  – густина суспензії або шлікера, з якого формується гранула (кг/м<sup>3</sup>);

$V_c$  – об'єм камери гранулятора або об'єм корисного завантаження (м<sup>3</sup>);

$n$  – кількість обертів або циклів за одиницю часу (1/с або об/с).

Фосфорні добрива (P) (суперфосфат, амофос).

Технологічний процес: обробка фосфорної руди кислотами, отримання гранул або порошку.

Основне обладнання: реактор кислотного розчинення; фільтри та промивні установки; гранулятор або сушарка для гранул; конвеєри та змішувачі.

Розрахунок обладнання:

Об'єм реактора визначається аналогічно азотним добривам, з поправкою на густину суспензії ( $\rho \approx 1800 \text{ кг/м}^3$ ).

Продуктивність гранулятора розраховується за об'ємом суспензії та швидкістю обертання барабана.

Комплексні добрива (NPK 15:15:15, NP 20:20).

Технологічний процес: змішування компонентів (амофос, аміачна селітра, калійні солі), гранулювання та сушіння, охолодження та фасування.

Основне обладнання: змішувач для однорідності суміші; гранулятор для формування гранул; сушарка для видалення надлишкової вологи; охолоджувач для стабілізації гранул; фасувальні машини для пакування.

Масову продуктивність обладнання визначають за формулою 3.4.

$$Q_m = V_m \cdot \rho \cdot n \quad (3.4)$$

Де:  $V_m$  – об'єм барабана;

$n$  – число обертів на годину.

Гранулятор та сушарка розраховуються аналогічно азотним добривам, з урахуванням сумарної густини суміші.

Біодобрива (препарати на основі мікроорганізмів).

Технологічний процес: культивування мікроорганізмів, висушування та гранулювання (сухі біодобрива), зберігання при контрольованих умовах.

Основне обладнання: біореактори, ферментери; сепаратори для видалення рідини; сушарки (ліофілізація або ротаційні); гранулятори або екструдери для формування гранул; контейнери для зберігання.

Об'єм реактора визначають за формулою 3.5.

$$V = \frac{Q \cdot 10^3}{\mu \cdot X \cdot t_c} \quad (3.5)$$

Де  $X$  – концентрація клітин;

$\mu$  – швидкість росту мікроорганізмів;

$t_c$  – час культивуації.

Проведений аналіз технологічних процесів та особливостей різних видів добрив дозволяє зробити кілька ключових висновків щодо вибору та розрахунку основного технологічного обладнання [31].

Вибір технологічного обладнання для виробництва мінеральних та комплексних добрив повинен здійснюватися з урахуванням фізико-хімічних характеристик сировини, специфіки добрива та особливостей протікання хімічних та фізико-хімічних процесів у виробництві. При цьому ключовим критерієм є відповідність матеріалів апаратів умовам взаємодії з агресивними середовищами, такими як концентровані кислоти та луки, що особливо актуально для виробництва азотних та фосфорних добрив, де застосовуються реакційні середовища високої активності.

Для калійних та комплексних добрив особлива увага приділяється проектуванню і підбору об'ємів грануляторів, сушарок та інших допоміжних агрегатів, оскільки від цих параметрів залежить розмір і щільність гранул, рівномірність розподілу поживних елементів у продукті, а також ефективність контролю вологості та температурного режиму на етапі сушіння.

Невідповідність об'єму апаратів або недостатня продуктивність обладнання можуть призвести до нерівномірного гранулювання, підвищеного пиління та втрат продукту під час транспортування і внесення, що знижує ефективність технологічного процесу та якість кінцевого добрива.

Крім того, вибір обладнання має враховувати характер взаємодії компонентів у суміші, особливості їх гранулювання та термостійкість матеріалів, що забезпечує стабільність фізико-хімічних властивостей добрив. Тому комплексний підхід до проектування технологічної лінії включає оцінку

сировини, розрахунок параметрів агрегатів, визначення матеріалів для апаратів та інтеграцію систем автоматичного контролю, що дозволяє підтримувати високу продуктивність виробництва при мінімізації втрат поживних елементів та збереженні екологічної безпечності процесу.

Виробництво біодобрив є особливо чутливим до технологічних параметрів, оскільки включає використання живих мікроорганізмів, чия життєздатність та активність залежать від умов середовища, у якому вони культивуються та обробляються. Тому для ефективного виробництва біодобрив необхідне застосування спеціалізованого технологічного обладнання, що забезпечує точний контроль температури, вологості, аерації та інших фізико-хімічних параметрів.

Недотримання цих умов може призвести до зниження активності мікроорганізмів, що безпосередньо впливає на біологічну ефективність готового продукту.

Ключовим етапом проектування виробничих ліній для біодобрив є розрахунок об'ємів реакторів, продуктивності грануляторів, масового потоку повітря в сушарках та характеристик змішувачів.

Такі розрахунки дозволяють забезпечити стабільну і ефективну роботу технологічного процесу, враховуючи задану потужність заводу, кількість сировини та специфіку мікробіологічних компонентів.

Правильне визначення цих параметрів сприяє підтриманню оптимальних умов для життєдіяльності мікроорганізмів, рівномірного розподілу поживних речовин у гранулах та забезпечує точність дозування біологічно активних компонентів [30].

Систематизація методичних підходів до вибору технологічного обладнання, а також використання математичних формул для розрахунку ключових агрегатів, дозволяє оптимізувати виробничий процес, підвищити якість і однорідність готової продукції, зменшити енергоспоживання та витрати на обслуговування.

Крім того, правильний інженерний підхід до підбору апаратів сприяє екологічній безпечності виробництва, оскільки зменшує ризик втрат мікроорганізмів у навколишнє середовище, забезпечує контроль за виділенням газів та запобігає забрудненню технологічних ланцюгів.

Таким чином, інтеграція принципів біотехнологічного контролю, інженерних розрахунків та автоматизації технологічних процесів є ключовою умовою для забезпечення високої ефективності та стабільності виробництва біодобрих, а також для отримання продукції з гарантованими агрономічними характеристиками і збереженням екологічної безпеки [31].

Комплексний підхід до підбору та розрахунку технологічного обладнання є основою ефективного та безпечного виробництва азотних, фосфорних, калійних, комплексних та біодобрих і дозволяє реалізувати сучасні стандарти промислового виробництва добрив.

## ВИСНОВКИ

У ході виконання кваліфікаційної роботи досягнуто поставленої мети – розроблено та обґрунтовано екологічно безпечну технологію виробництва та застосування добрив, спрямовану на збереження довкілля та раціональне використання природних ресурсів.

Проведений аналіз сучасного стану виробництва і використання мінеральних та органічних добрив засвідчив їхню важливу роль у забезпеченні високої продуктивності аграрного сектору, водночас виявивши низку екологічних проблем, пов'язаних із надмірним техногенним навантаженням на ґрунти, водні об'єкти та атмосферу.

Особливу увагу в роботі приділено впливу традиційних технологій удобрення на деградацію ґрунтів, накопичення нітратів у сільськогосподарській продукції та порушення природних біогеохімічних циклів, що підтверджує необхідність пошуку альтернативних, екологічно орієнтованих рішень.

Обґрунтовано доцільність поєднання мінеральних і органічних компонентів добрив, а також використання біологічно активних добавок, що сприяють покращенню родючості ґрунтів і підвищенню ефективності засвоєння поживних елементів рослинами.

Запропонована екологічно безпечна технологія виробництва та застосування добрив відповідає сучасним вимогам сталого розвитку, поєднує економічну доцільність із екологічною відповідальністю та створює передумови для подальших наукових досліджень у сфері екологізації сільського господарства.

У ході аналізу сучасного стану виробництва та застосування добрив встановлено, що мінеральні й органічні добрива відіграють ключову роль у підвищенні врожайності сільськогосподарських культур та забезпеченні продовольчої безпеки.

У результаті дослідження традиційних і сучасних технологій виробництва добрив встановлено, що, попри їхню ефективність у забезпеченні потреб сільського господарства, традиційні технології характеризуються значним негативним впливом на навколишнє середовище через високу енергоємність, утворення відходів та викиди забруднювальних речовин.

Під час виконання завдання обґрунтовано доцільність використання екологічно безпечної, доступної та відновлюваної сировини для виробництва добрив. Оптимізовані технологічні параметри виробничого процесу дозволяють підвищити ефективність засвоєння поживних елементів рослинами, знизити втрати діючих речовин і мінімізувати утворення шкідливих побічних продуктів, що відповідає вимогам екологічної безпеки.

Також була запропонована технологічна схема виробництва добрива базується на принципах маловідходності та енергоефективності й передбачає раціональне використання ресурсів, повторне залучення вторинних матеріалів і скорочення енерговитрат.

Результати оцінки підтвердили відповідність запропонованої технології чинним екологічним нормам і засвідчили можливість зниження антропогенного навантаження за умови дотримання рекомендованих технологічних і природоохоронних заходів.

Оцінювання можливого впливу запропонованої системи удобрення показало її позитивний вплив на родючість ґрунтів, фізико-хімічні та біологічні показники ґрунтового середовища, а також на ріст і розвиток рослин. Застосування добрив за розробленою технологією сприяє зниженню ризиків забруднення водних об'єктів, збереженню біорізноманіття та стабільності агроєкосистем.

На основі проведених досліджень сформульовано практичні рекомендації щодо впровадження екологічно безпечних технологій у промислове виробництво добрив, які передбачають поетапну модернізацію обладнання, дотримання екологічних стандартів та впровадження систем екологічного контролю.

## ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

- 1 Мінеральні добрива [Електронний ресурс] // Агрогрупа Фрея. – Режим доступу : <https://www.freya.ua/mineralni-dobruva> (дата звернення : 10.09.2025).
- 2 Що таке мінеральні добрива та їх важливість [Електронний ресурс] // Tetra-Agro. – Режим доступу : <https://tetra-agro.com.ua/?srsltid=AfmBOopavUEQ5sRx2ONfSdZkOR0Tb4qOJj6YfagskLGP Oenn1PYC5sZf> (дата звернення : 10.09.2025).
- 3 Fertilizer use and crop nutrition. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations, 2021. – P. 70-90.
- 4 Madagoudra Y.B. Sustainable soil fertility management [Electronic resource] / Y.B. Madagoudra, R Lokesh // Researchgate. – 2021. – Access mode : [https://www.researchgate.net/publication/353453282\\_SUSTAINABLE\\_SOIL\\_FERTILITY\\_MANAGEMENT](https://www.researchgate.net/publication/353453282_SUSTAINABLE_SOIL_FERTILITY_MANAGEMENT) (date of appeal : 15.09.2025).
- 5 Професійне виробництво мінеральних добрив в Україні [Електронний ресурс] // Dünger. – Режим доступу : <https://dunger.ua/p/pro-kompanii/> (дата звернення : 15.09.2025).
- 6 Види мінеральних добрив [Електронний ресурс] // УкрХімАналіз. – Режим доступу : <https://himanaliz.ua/uk/vidi-mineralnikh-dobriv/> (дата звернення : 15.09.2025).
- 7 Bhatia K.S. Studies on Soil Characteristics Related to Erodibility under Different Types of Land Use / K.S. Bhatia, A.K. Srivastava // Journal of Indian Society of Soil Sciences, 2016. – P. 201-204.
- 8 Мінеральні добрива [Електронний ресурс] // УАПГ. – Режим доступу : <https://uapg.ua/blog/mineralni-dobruva> (дата звернення : 26.09.2025).
- 9 Havlin J.L. Soil Fertility and Fertilizers: An Introduction to Nutrient Management // J.L. Havlin, S.L. Tisdale, W.L. Nelson, J.D. Beaton. – 8th Edition. Pearson, 2019. – P. 15-19.

10 Sustainable Management of Fertilizers and Soil Fertility / United Nations Environment Programme, 2020. – P. 37-40.

11 Чернищенко М.С. Екологічно безпечні системи удобрення: теорія та практика / М.С. Чернищенко, Т.П. Романюк. – Харків: ХНАУ, 2022. – С. 8-19.

12 Beus C.E. Competing Paradigms: An Overview and Analysis of the Alternative-Conventional Agriculture Debate / C.E. Beus // Research Rural Society Development, 2015. – P. 23-50.

13 Бондар І.В. Біодобрива: сучасні підходи та перспективи використання / І.В. Бондар. – Львів: ЛНУ імені Івана Франка, 2019. – С.75-86.

14 Shah F. Soil and Crop Management Strategies to Ensure Higher Crop Productivity within Sustainable Environments / F. Shah, W. Wu // Sustainability. – 11(5). – 2019. – P. 30-40.

15 Board for International Food and Agricultural Development Task Force (BIFAD) / Environment and Natural Resources: Strategies for Sustainable Agriculture. US Agency for International Development. – Washington, DC, 2015. – P. 23-45.

16 Литвиненко О.М. Вплив органо-мінеральних добрив на родючість ґрунтів і врожайність культур / О.М. Литвиненко // Екологія та аграрні науки. – Вип. 10(1). – 2018. – С. 14-21.

17 Rodriguez R.M. Soil Fertility: An Important Aspect of Sustainable Agriculture / R.M. Rodriguez. – Lulu Publishers, 2015. – P. 15-19.

18 Волошин М.Д. Мінеральні добрива / М.Д. Волошин, Я.М. Черненко, А.В. Іванченко, М.А. Олійник // Технологія неорганічних речовин : Навчальний посібник. – Дніпродзержинськ : ДДТУ, 2016. – С 8-34.

19 Bhawalkar U.S. Vermiculture Biotechnology, in Organics in Soil Health and Crop Production / U.S. Bhawalkar, V.U. Bhawalkar, P.K. Thampan // Peekay Tree Crops Development Foundation. – Cochin, India, 2016. – P. 68-85.

- 20 Borlaug N.E. Feeding a Human Population that Increasingly Crowds a Fragile Planet / N.E. Borlaug, R.D. Christopher // Keynote Lecture, 15th World Congress of Soil Science, 2018. – P. 10-15.
- 21 Chatterjee B.N. Present Trends in Research on Intercropping / B.N. Chatterjee, B.K. Mandal // Indian Journal of Agricultural Sciences, 2019. – P. 507-518.
- 22 Шевчук А.В. Мінеральні добрива: хімічна сировина та технології виробництва / А.В. Шевчук. – Київ: Аграрна освіта, 2017. – С. 15-26.
- 23 Коваленко В.М. Технології виробництва мінеральних добрив / В.М. Коваленко, С.І. Петренко. – Київ: Наукова думка, 2020. – 120 с.
- 24 Іваненко О.П. Комплексні добрива та їх вплив на родючість ґрунтів / О.П. Іваненко // Агрохімія та ґрунтознавство. – Вип. 12(3). – 2018. – С. 45-53.
- 25 Brady N.C. The Nature and Properties of Soils / N.C. Brady // 10th Edition. Macmillan, New York, 2019. – P. 20-22.
- 26 Brownwell P.F. Sodium as an Essential Micronutrient Element for Some Higher Plants / P.F. Brownwell // Plant Soil, 2017. – P. 161-164.
- 27 Bullock D.G. Crop Rotation / D.G. Bullock // Review of Plant Science, 2017. – P. 309-326.
- 28 Buringh P. An Assessment of Losses and Degradation of Productive Agricultural Land in the World / P. Buringh // FAO. Rome, Italy, 2020. – P. 60-71.
- 29 Гнатюк П.О. Технологія гранульованих добрив та їх вплив на ефективність живлення рослин / П.О. Гнатюк // Агроінновації. – Вип. 5(2). – 2021. – С. 23-32.
- 30 Астрелін І.М. Технологія фосфоровмісних добрив, кислот і солей. /І.М. Астрелін, Л.Л. ТОВАЖНЯНСЬКИЙ, О.Я. ЛОБОЙКО та ін; за ред.. Л.Л. ТОВАЖНЯНСЬКОГО. – Харків: Видавництво «Підручник НТУ «ХПІ», 2017. – С. 130-145.
- 31 Клименко М.О. Якість та ефективність фосфоритів / М.О. Клименко, Д.В. Лико, С.М. Лико. – Рівне: НУВГП, 2015. – 137 с.

32 Текстові документи. Загальні вимоги та правила складання СОУ 207.01 : 2025 / О.М. Синюк, В.Г. Лопатовський, Г.В. Красильникова, І.В. Андрощук, В.С. Яремчук, Н.В. Подлевська. – Хмельницький : ХНУ, 2025. – 36 с.

33 Кваліфікаційна робота магістра : методичні рекомендації щодо її підготовки та виконання здобувачами вищої освіти спеціальності 161 «Хімічні технології та інженерія» / уклад.: О.А. Параска, Т.В. Іванішена. Хмельницький : ХНУ, 2024. 43 с.

34 Бібліографічний запис. Загальні вимоги та правила складання. СОУ 207.02:2025 / О.М. Синюк, О.П. Шмурікова. – Хмельницький : ХНУ, 2025. – 38 с.