

УДК 502.174:661.152.3'1'2'3(143.5)

№ державної реєстрації 0119U100834

Інв. Ні

Міністерство освіти і науки України

Сумський державний університет

40007, Суми, вул. Р.-Корсакова, 2;

тел. (0542) 33-41-08/33-40-49

ЗАТВЕРДЖУЮ

Проректор з наукової роботи

\_\_\_\_\_ А.М. Черноус

### **Звіт з досліджень**

виконання держбюджетної науково-дослідної розробки

**«Процес формування нових екологічно безпечних добрив пролонгованої дії  
на основі сировини фосфоритових родовищ»**

**Розробка та створення дослідного устаткування вузла капсулювання,  
проведення випробувань  
(проміжний)**

**Керівник науково-дослідної роботи**

**Кандидат хімічних наук,**

**старший викладач кафедри ТПХ**

**Г.О. Яновська**

**2020 р.**

**Рукопис було завершено 24 грудня 2020 року.  
Результати цієї роботи були розглянуті вченою радою,  
протокол від 2020.12.26 № \_**

## СПИСОК АВТОРІВ

Керівник науково-дослідної роботи Доктор філософії (хімічні науки)	Г.О. Яновська (підрозділ 2, висновки)
Відповідальний виконавець: Старший науковий співробітник Доктор технічних наук (технічні науки)	С.В. Вакал (підрозділ 1, висновки)
Виконавці: Доктор філософії (технічні науки)	А.Є. Артюхов (підрозділ 4, 5)
Науковий співробітник Доктор філософії (технічні науки)	В.С. Вакал (підрозділ 3)
Доктор філософії (економічні науки)	В.Ю. Школа (підрозділи 1, 4)
Доктор філософії (педагогічні науки)	Т.В. Диченко (підрозділ 2)
Кандидат технічних наук	Б.О. Максименко (підрозділ 1)
Науковий співробітник	А.М. Зеленський (підрозділ 1,2)
Інженер 1 кат.	В.І. Скляр (підрозділ 2)
Лаборант	Н.М. Рудавіна (підрозділ 2)

## РЕФЕРАТ

Звіт про дослідницьку роботу: 79 с., 24 рисунків, 15 таблиці, 92 посилання.

Екологічна безпека, мінеральні добрива, органо-мінеральні добрива, фосфорити, гумати, фосфатовмісна оболонка, тарілчастий гранулятор, екологічно-економічний ефект, методика розрахунку тарілчастого гранулятора.

Одним із сучасних викликів сьогодення є зменшення деструктивного впливу мінеральних добрив на довкілля і підвищення ефективності їх використання. Розгляд структури виробництва мінеральних добрив в Україні показує, що для забезпечення потреби сільськогосподарського виробника в азотних добривах достатньо вітчизняних потужностей. Для цього пропонується екологічна інновація, характеристики якої можна змінювати відповідно до потреб споживачів. В основі нововведення знаходиться технологія отримання складних органо-мінеральних NPK-добрив шляхом капсулювання гранули карбаміду фосфатно-калійною оболонкою з добавками мікроелементів і гуматів. Як показали результати досліджень, технологія може реалізуватися з усіма зразками добрив. Перевагою такої технології є можливість виробництва добрив нового покоління Industry 5.0. За рахунок зміни композиційного складу оболонки гранул досягається високій рівень кастомізації добрива при одночасному скороченні логістичних витрат, що дозволяє значно підвищити рівень їх конкурентоздатності як на внутрішньому, так і на зовнішньому ринках.

Проведений орієнтовний розрахунок екологічної та економічної ефективності виробництва і застосування напівсухого методу отримання добрива з порошків фосфорита і карбаміду, капсульованого органо-мінеральною фосфатовмісною оболонкою, показав, що зменшення вологості фосфатовмісного покриття з 50 % до 12 % дозволяє зменшити енергетичні витрати на отримання добрива і теплове забруднення довкілля на 70 % у порівнянні з методом отримання гранул з розчинів. Запропоноване технічне рішення дозволяє запропонувати сільськогосподарським споживачам складне азотно-фосфорно-калійне добриво пролонгованої дії, а зміна товщини покриття надає можливість змінювати вміст поживних речовин NPK-добрива.

Підбір складу оболонки добрив дозволяє забезпечити внесення поживних елементів при мінімальному агрогенному навантаженні.

## ЗМІСТ

Вступ	
1 Сучасний стан застосування добрив	
1.1 Аналіз недоліків сучасних складних добрив	
1.2 Розробка пропозицій щодо корегування елементного складу добрив та визначення сировинних компонентів	
1.3 Розробка складу покриття і режимів нанесення його на гранулу	
1.4 Опис експериментальної установки	
1.5 Методика проведення досліджень	
2 Експериментальні дослідження характеристик покриття при формуванні фосфатовмісної оболонки	
3 Еколого-економічне обґрунтування запропонованих технологічних основ капсулювання добрив	
4 Маркетингове дослідження ринку екологічної інновації	
4.1 Оцінка ринкових перспектив задуму нового товару, прогнозування життєвого циклу інновації (зокрема, етапів інноваційного та кастомізаційного циклів)	
4.2 Попередній аналіз можливості виробництва і збуту нового продукту, оцінка комерційних перспектив інноваційного продукту	
5 Створення дослідницького стенду для визначення закономірностей пролонгації дії розроблених добрив	
5.1 Розробка експериментальної установки для визначення закономірностей пролонгації дії розроблених добрив	
5.2 Розробка методики розрахунку тарілчастого гранулятора та програмна реалізація розрахунку	
Висновки	
Список літератури	

## ВСТУП

Мінеральні добрива відіграють значну роль при інтенсивному вирощуванні сільськогосподарської продукції та є одним із факторів, що підтримують родючість ґрунтів. Розгляд структури виробництва мінеральних добрив в Україні показує, що для забезпечення потреби сільськогосподарського виробника в азотних добривах достатньо вітчизняних потужностей. Але наразі виробництва фосфорних і калійних добрив не можуть забезпечити потребу країни в добривах у зв'язку з нестачею переробних потужностей та відсутністю розвиненої фосфатної і калійної сировинної бази. У даний час для одержання фосфатовмісних добрив вітчизняними підприємствами застосовуються фосфорити Близького Сходу та Північної Африки з певними екологічними обмеженнями за вмістом важких металів та радіоактивністю [1]. Доцільність видобутку апатитового концентрату для одержання фосфатної кислоти і добрив на її основі в Україні можлива лише при сумісному збагаченні ільменітового і апатитового концентратів. На сьогодні видобуток калійних солей в Україні припинено, а перспектива його відновлення потребує суттєвих капіталовкладень. Проблема підтримки родючості ґрунтів посилюється також через неможливість забезпечення у повному обсязі аграрного сектору також органічними добривами.

У зв'язку з екологічними вимогами щодо зниження агрогенного навантаження на довкілля, необхідністю зменшення невиробничих втрат при внесенні добрив і їх високою вартістю розробляються нові види добрив, які мають більш високий коефіцієнт використання поживних елементів і хімічний склад, сформований відповідно до потреби рослин і поля [2].

Одним із шляхів зниження агрогенного навантаження на довкілля є застосування екологічно безпечних добрив. Проведені теоретичні й експериментальні дослідження з розробки рецептури таких добрив показали, що найбільш технологічним напрямком є капсулювання азотних прілл фосфатовмісними оболонками. Таке технічне рішення дозволяє запропонувати сільськогосподарським споживачам складне азотно-фосфорно-калійне добриво

продовженої дії, а зміна товщини покриття надає можливість змінювати вміст поживних речовин NPK-добрива. Наразі існує значна кількість вітчизняних родовищ фосфоритового і фосфат-глауконітового концентрату, які мають високий вміст фосфору в засвоюваній формі. Спільні дослідження ННЦ «Інститут ґрунтознавства і агрохімії ім. О. Н. Соколовського» та НДІ МІНДІП СумДУ з оцінки агрохімічної ефективності розроблених складів азотно-фосфорно-калійних добрив із застосуванням як фосфатної складової фосфоритового та фосфат-глауконітового концентрату показали перспективність даного напрямку [3].

Формування добрива відбувається шляхом нанесення фосфоритового борошна на гранули азотного добрива (переважно карбаміда) із застосуванням пластифікатора. Такий технологічний прийом дозволяє одержувати складне фосфатовмісне добриво безкислотним способом. Пластифікаторами запропоновані і досліджені в лабораторних і мікропольових умовах розчини азотних і калійних добрив, гумати лужних і лужноземельних металів тощо [4].

Капсульовані добрива, що розробляються, дозволяють мати повний спектр поживних елементів (азот, фосфор, калій), і при більш низькій швидкості розчинення фосфору і калію, з яких складається оболонка азотної гранули, дають можливість отримати складне NPK-добриво методом агломерації порошків [5]. При цьому до складу фосфатовмісної оболонки можливе внесення органічної складової і мікроелементів [4].

# 1 СУЧАСНИЙ СТАН ЗАСТОСУВАННЯ ДОБРИВ

## 1.1 Аналіз недоліків сучасних складних добрив

Проблема деградації ґрунтів викликає значну стурбованість науковців останніми десятиріччями. Одним із аспектів цього питання є збереження та зростання родючості ґрунтів, їх захист від антропогенного навантаження при одночасному вирішенні продовольчої проблеми.

Збереження родючості ґрунтового покриву неможливе без широкого застосування мінеральних добрив, що дозволяє, окрім підвищення врожайності сільськогосподарських культур, частково компенсувати зниження природної родючості ґрунтів. За оцінками агрохімічної науки [6] частка мінеральних добрив у забезпеченні зростання врожайності становить 20–40 %, а співвідношення основних поживних елементів азоту, фосфору і калію для сільськогосподарських культур, як правило, повинна становити 1:1:1 [7-11]. При цьому високі дози азотних добрив, необхідних в початковий період вегетації, можуть чинити негативний вплив на довкілля [5]. Так, їхня висока розчинність та властивість легко трансформуватися у ґрунті більше, ніж на 40 %, знижують коефіцієнт використання рослинами азоту добрив, та спричиняють антропогенне забруднення довкілля через високий рівень втрат азоту (до 50 %) в газоподібному й розчиненому станах, а також призводять до забруднення сільськогосподарської продукції нітратами та нітритами. За промивного водного режиму ґрунтів нітрати здатні вимиватися за межі орного шару до підґрунтових вод [5]. З огляду на це, розробляються різні способи зниження швидкості розчинення азотних гранул у ґрунті. Найбільш відомі хімічні способи реалізуються шляхом створення спеціальних малорозчинних добрив, введення в гранули інгібіторів нітрифікації, а також капсулювання гранул оболонками різних складів [4, 5].

Дослідження впливу азотних добрив на органічні речовини, засвоєння рослинами ґрунтового азоту та його втрати описані у роботах [12, 13, 14]. Автор [12] визначає, що з метою збереження вмісту азоту добрива повинні бути

закладені в ґрунт, оскільки навіть перебування їх на відкритому ґрунті протягом 2–3 год. різко знижує вміст азоту. При цьому особливістю азоту добрив є те, що його трансформація в органічну форму проходить протягом декількох тижнів, отже, його необхідно зберегти максимально і надовго в мінеральній формі. Автор [13] визначає, що найбільш засвоюваними добривами є рідкі, але вони мають значні втрати у доквілля. Більш концентрованими є тверді добрива. Для азотних добрив властива, в основному, пріллєвана форма, що вимагає максимально монодисперсних гранул (прілл), які вигідно відрізняються від порошкоподібних меншою злежуваністю, більшою статичною міцністю і мають зменшену поверхню контакту з ґрунтом [14]. Ще меншу поверхню мають макрогранули (супергранули) азотних добрив з розміром гранул 5–12 мм [15]. При цьому ці мінеральні добрива виробляють на апаратах окатування, що дозволяє істотно підняти міцність гранул і тим самим частково знизити швидкість їх розчинення. Зміна технології гранулювання азотних добрив із прілл на технології окатування або пошарової кристалізації на поверхні частинок, дозволяє отримувати більш міцні гранули з діаметром основної фракції 2–4 мм. Але усім формам азотних добрив, як правило, властивий головний недолік – висока розчинність, що потребує поліпшення фізико-хімічних властивостей азотних добрив.

Питанням вирішення цієї проблеми присвячені дослідження [16, 17, 18], які спрямовані насамперед на зменшення швидкості розчинення гранул, підвищення їх міцності і зниження злежування.

У даний час завдання поліпшення фізико-хімічних властивостей азотних добрив вирішують кількома способами.

1. Автори [14, 19] пропонують введення різного роду добавок у плав або розчин азотних добрив до здійснення процесу кристалізації або грануляції, що дозволяє змінити фізичну структуру і властивості гранул у процесі їх формування. Недоліком цього методу є те, що кондиційна добавка рівномірно розподілена по всьому об'єму гранули, а не зосереджена на її поверхні. При цьому проблема зниження злежуваності і уповільнення швидкості розчинення азотної частини вирішується слабо. Альтернативою каркасної структури гранули є створення



спеціальних повільно діючих добрив із застосуванням інгібіторів нітрифікації. Водночас, застосування повільно діючих мінеральних добрив не дозволяє контролювати інтенсивність вивільнення елементів живлення в ґрунт та погоджувати ці процеси з періодами найбільш інтенсивного їх споживання рослинами [20].

2. У роботі [17] запропоновано інший спосіб – нанесення на поверхню гранул азотних добрив поверхнево-активних речовин, що змінюють гідрофільні властивості продукту. До недоліків цього способу слід віднести: вирішення тільки головного завдання – зниження злежування добрив, а також забруднення ґрунтового шару синтетичними сполуками.

3. Покриття гранул добрив органічними і неорганічними речовинами, які ізолюють поверхні частинок одну від одної для запобігання контакту між ними. Цей спосіб характеризується різними варіантами складу покриттів. Найбільш відомим є покриття гранул азотних добрив різного роду полімерами і смолами [21, 22, 23]. Склад і фізичні характеристики полімерного покриття дають можливість приурочити вивільнення елементів живлення з добрива до періоду інтенсивного росту рослин. У результаті зростає коефіцієнт використання елементів із добрив і знижуються їх непродуктивні витрати. Практика свідчить, що частіше за все покриття гранульованих добрив полімерними захисними плівками є більш економічно виправданим, ніж виробництво спеціальних повільно діючих добрив [24]. Більш ранні роботи дослідників були спрямовані на вирішення тільки однієї задачі – створення тонкої оболонки на гранулі, яка має певні пористі властивості [17]. Існує ряд технічних рішень, присвячених різним полімерним складам для покриття гранул [18, 19, 22, 25].

Капсулювання добрив полімерами дозволяє зменшити контакт гранули з ґрунтом. Водночас, застосування полімерних покриттів має ряд недоліків, істотними з яких є: накопичення у ґрунтах полімерних сполук і смол, забруднення ґрунтового шару продуктами їх розкладу, можливість точкового пошкодження покриття, при якому нівелюється ефект мембрани, а також інертність матеріалу покриття по відношенню до сільськогосподарських культур.

Було розроблено рецептури покриттів, які характеризуються значною товщиною, до 50 % мас. від загальної маси гранули [26]. До таких покриттів відносять покриття амофосом, трикальційфосфатом, фосфоритом та ін. Даний вид покриттів має співвідношення ядра гранули до покриття рівне  $1 : (0,8-1,2)$ , що дозволяє до фосфатного компонента оболонки вносити стимулятори росту, органіку, інші елементи живлення [27, 28].

Азотні добрива з покриттям сірчаною оболонкою вже доведені до промислового виробництва. Одними з перспективних компонентів для капсулювання, в яких немає інертних елементів, є оболонки на основі фосфатів амонію і кальцію. Такі оболонки дозволяють формувати складні NP і NPK добрива, в яких фосфатне або фосфатно-калійне покриття виступає мембраною, через яку дифундує азотне ядро гранули [29-31].

На сьогодні до складу покриття вводиться цілий ряд фосфатних і калійних сполук, а також мікроелементи й органічна складова на основі природних речовин (торф, буре вугілля, сапропель і ін.) і відходів виробництва. Цей захід є економічно привабливим у застосуванні як під багаторічні насадження, так і під польові й овочеві культури.

Таким чином у гранулі створюється азотно-фосфатна композиція поживних елементів. При цьому фосфатна оболонка є бар'єром для дифузії азотної частини гранули, продовжуючи час її розчинення. Основними завданнями такої оболонки є вивільнення в ґрунт азотних і фосфатних поживних речовин із гранули, відповідно до агрохімічної потреби рослин. Уповільнене розчинення фосфору, в порівнянні з азотними добривами, дозволяє використовувати його як основний елемент покриття [5].

## **1.2 Розробка пропозицій щодо корегування елементного складу добрив та визначення сировинних компонентів**

Одним із шляхів зниження агрогенного навантаження на довкілля є застосування екологічно безпечних добрив. Ефективне використання азоту

добрив можливе лише при одночасному внесенні інших поживних речовин (фосфору, калію, окремих мікроелементів та органіки), але може призвести до агрогенного забруднення ґрунтів важкими металами, арсеном і радіоактивними елементами.

Зниження техногенного навантаження на довкілля та підвищення ефективності використання азотних добрив може досягатися шляхом зниження швидкості їх розчинення при капсулюванні. Підбір складу оболонки добрив дозволяє не тільки уповільнити вивільнення азоту, а й забезпечити внесення інших поживних елементів при мінімальному агрогенному навантаженні [23, 25, 28, 32].

Ідеальний матеріал для капсулювання повинен мати такі характеристики:

1. Хороші реологічні властивості при високій концентрації та легка технологічність під час капсулювання.
2. Здатність диспергуватись або емульгувати активний матеріал і стабілізувати вироблену суміш.
3. Нереакційна здатність матеріалу, що підлягає капсулюванню, як під час обробки, так і при тривалому зберіганні.
4. Здатність ущільнювати та утримувати активний матеріал у своїй структурі під час обробки або зберігання.
5. Здатність повністю вивільняти розчинник або інші матеріали, що використовуються під час процесу капсулювання умовах сушіння або інших умов розчинення.
6. Здатність забезпечити максимальний захист активного матеріалу від умов довкілля (наприклад, кисню, тепла, світла, вологості).
7. Хімічна нереактивність з активними матеріалами ядра гранули [33].

Проведені теоретичні й експериментальні дослідження з розробки рецептури таких добрив показали, що найбільш технологічним напрямком є капсулювання азотних прілл фосфатовмісними оболонками на основі фосфоритного борошна. Таке технічне рішення дозволяє запропонувати сільськогосподарським споживачам складне азотно-фосфорно-калійне добриво

продовженої дії, а зміна товщини покриття надає можливість змінювати вміст поживних речовин NPK-добрива.

Отже, може бути запропонована гнучка технологія одержання складного органо-мінерального добрива продовженої дії безкислотним способом, яка дозволяє одержувати добрива широкого марочного асортименту. За результатами порівняльного аналізу технологій сульфатокислотного і безкислотного способу одержання складних добрив можна зробити висновок, що безкислотна технологія має переваги за показниками: вологість шихти, яка менше у 3,5 рази, а, відповідно, має майже у 4 рази менші викиди газів системи абсорбції. Отже, впровадження у виробництво капсульованих органо-мінеральних добрив є перспективним з технологічної, економічної і екологічної точки зору.

### **1.3 Розробка складу покриття і режимів нанесення його на гранулу**

Фізична сутність процесу капсулювання полягає в реалізації способу агломерації порошку на ядрі гранулювання (в наших дослідженнях – пріллах). При цьому прілли азотних (амонійна селітра, карбамід) і азотовмісних (NP, NPK) добрив фракції 1–2 мм можуть застосовуватися як ядро гранули, а як порошок – фосфоритне борошно (фосфат-глауконітовий концентрат Ново-Амвросіївського родовища з умістом  $P_2O_5$  – 15 %). Сполучною речовиною (пластифікатором) застосовувалися водні розчини солей (розчин карбаміду та гумати). При потраплянні крапель пластифікатору на поверхню прілли, частина цієї поверхні зволожується і до неї прилипає частинка порошкоподібного фосфату. Отже, відбувається збільшення товщини покриття гранули. Гідродинаміка руху гранул по поверхні тарілчастого гранулятора така, що в процесі зростання товщини покриття, гранули окатуються за своїми траєкторіями і зміщуються поступово до місця вивантаження готового продукту, при цьому відповідно до зміни розміру гранул матеріал покриття ущільнюється і таким чином формується оболонка на основі фосфатів.

Основними механізмами виходу азоту з ядра гранули є дифузія, деградація оболонки, використання розчинника, рН, температура та тиск. На практиці використовується комбінація більш ніж одного механізму. Дифузія виникає особливо тоді, коли стінка капсули ціла; швидкість вивільнення регулюється хімічними властивостями серцевини та матеріалу покриття та деякими фізичними властивостями покриття.

Вибір найбільш прийняттого способу в загальному випадку залежить від типу ядра гранули, матеріалу оболонки, розміру необхідних частинок, фізико-хімічних властивостей ядра та покриття, механізму вивільнення, масштабу виробництва та вартості.

Як фосфатовмісну складову оболонки використовували фосфат-глауконітовий концентрат Ново-Амвросіївського родовища. Показники концентрату наведено в таблиці 1.1.

Таблиця 1.1 – Хімічний склад фосфат-глауконітового концентрату

Найменування показника і одиниця виміру	Результат аналізу
Масова частка загальних фосфатів у перерахунку на $P_2O_5$ заг, %	15,0
Масова частка засвоюваних фосфатів у перерахунку на $P_2O_5$ засв, %	13,1
Масова частка води, %	1,27

Дисперсний склад фосфат-глауконітового концентрату Ново-Амвросіївського родовища наведено у таблиці 1.2.

Таблиця 1.2 – Дисперсний склад фосфат-глауконітового концентрату

Фракція часток розміром	Масова частка, %
> 0,4 мм	0,85
> 0,315 мм	1,27
> 0,28 мм	2,54
> 0,2 мм	0,56
> 0,1 мм	37,88
> 0,063 мм	21,83
< 0,063 мм	35,07

Застосування фосфат-глауконітового концентрату Ново-Амвросіївського родовища передбачає розробку покриття, що містить фосфатну і калійну складову капсульованої гранули карбаміду. Пластифікаторами були застосовані баластні гумати кальцію і калію та розчин калімагу (суміші солей калію і магнію). Вибір перших двох видів пластифікатору обґрунтований необхідністю введення до складу гранули органічної складової, яка крім в'язучих властивостей позитивно впливає на вміст гумусу в ґрунті і передбачає збільшення коефіцієнта використання поживних елементів гранули. Введення кальцію в добриво нейтралізує кислотність ґрунту і зменшує втрати мінеральних компонентів ґрунту. Додавання до складу оболонки мікроелементів в хелатній формі дозволяє підвищити агрохімічну цінність добрива за рахунок підвищення стійкості рослин до захворювань і несприятливих факторів довкілля. [33, 34, 35, 36, 37]. Калімаг (46 %  $K_2O$ ) застосовувався для збагачення капсульованого добрива поживними калієм і магнієм.

Баластні гумати кальцію і калію були отримані з низинного торфу Глухівського родовища Сумської області на модельному гомогенізаторі. Хімічний склад гуматів кальцію і калію наведено в таблиці 1.3.

Таблиця 1.3 – Хімічний склад гуматів кальцію і калію

Найменування показника й одиниці вимірювання	Результат аналізу	
	Гумат кальцію	Гумат калію
pH (10 % водний розчин)	9,0	11,65
Масова частка води, %	89,5	83,4
Масова частка гуматів (у перерахунку на суху речовину), %	16,9	30,8
Масова частка загального кальцію (в перерахунку на суху речовину), %	6,0	-
Масова частка водорозчинного кальцію (в перерахунку на суху речовину), %	0,3	-
Масова частка магнію, % (в сухій речовині)	0,8	5,26
Масова частка загального калію $K_2O$ , % (в сухій речовині)	0,05	0,61

## 1.4 Опис експериментальної установки

Процес отримання капсульованого добрива полягає у формуванні фосфатовмісної оболонки методом агломерації на поверхні гранул карбаміду за наявності пластифікатора.

З метою оцінки технологічних параметрів процесу капсулювання були проведені експериментальні дослідження на модельному тарілчастому грануляторі за безперервного режиму роботи обладнання (рис. 1.1).

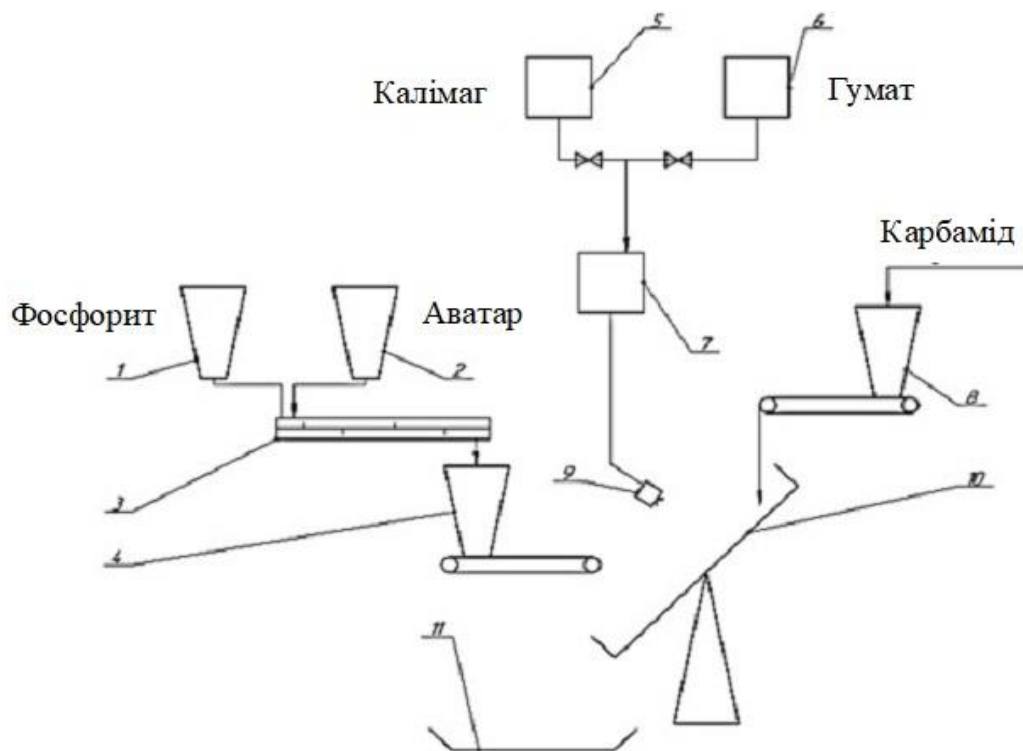


Рисунок 1.1 – Схема експериментального стенду для одержання органічно-мінеральних добрив: 1 – фосфоритний бункер; 2 – бункер мікроелементів; 3 – змішувач; 4 – дозатор; 5 – ємність для розчину калію; 6 – бак для розчину гумату; 7 – калій-магнієвий резервуар для змішування з гуматом; 8 – блок живлення гранул сечовини; 9 – насадка; 10 – таріль гранулятора; 11 – лоток для гранульованого продукту

Тарілчастий гранулятор мав діаметр тарелі 500 мм і висоту борту 105 мм. Кут нахилу тарелі становив 45 град. Число обертів тарелі 23 об/хв. Установка

обладнана стрічковими дозаторами порошку і гранул мінеральних добрив, а також пневматичним розпилувачем сполучної речовини. Готові гранули з покриттям вивантажувалися в піддон, який знаходився під таріллю гранулятора, і потім розсіювалися, висушувалися і аналізувалися.

### **1.5 Методика проведення досліджень**

Дослідження з капсулювання добрив проводилися на лабораторній установці на основі тарілчастого гранулятора. Порошкоподібний фосфат-глауконітовий концентрат попередньо змішувався у змішувачі з мікроелементним комплексом «Аватар». У таріль гранулятора завантажували певну кількість гранул (прілл) карбаміду. Діаметр тарелі 500 мм, висота борта 105 мм, число обертів тарелі  $23 \text{ хв}^{-1}$ . Із змішувача порошок за допомогою стрічкового дозатора прямував на таріль гранулятора на шар гранул карбаміду. На рухомий шар гранул розпорошувався пластифікатор, в якості якого використовувався баластовий гумат калію. Після формування фосфатовмісної оболонки на пріллах карбаміду гранули вивантажувалися на сита і розсіювалися за фракціями. Товарна фракція подавалась в сушильну шафу на сушку.

Попередня підготовка фосфат-глауконітового концентрату Ново-Амвросіївського родовища полягала в його розмолі і застосуванні для капсулювання порошку фракції менше 400 мкм. Змішування порошку концентрату і мікроелементного комплексу здійснювали в одновальному змішувачі з подальшою подачею суміші в стрічковий дозатор. Розчин баластних гуматів калію або кальцію попередньо готували з низинного торфу Глухівського родовища Сумської області на механічному гомогенізаторі, який потім розпорошувався форсункою на шар рухомих в тарілі гранулятора гранул.

Під час проведених досліджень витрати реагентів визначалися ваговим методом на вагах ВЛКТ-500, процес гранулоутворення на тарелі контролювався візуально, розсіювання гранул проводили на приладі РКФ-2У, температура



сушіння в сушильній шафі СНОЛ-3,5.3,5.3,5/3,5-И1 підтримувалася автоматично, міцність отриманих гранул визначалася на приладі ППГ-1М.

Загальний вигляд досліджуваних капсульованих добрив наведено на рисунку 1.2.



Рисунок 1.2 – Загальний вигляд одержаних капсульованих гранул

## 2 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ХАРАКТЕРИСТИК ПОКРИТТЯ ПРИ ФОРМУВАННІ ФОСФАТОВМІСНОЇ ОБОЛОНКИ

З метою оцінки технологічних параметрів процесу капсулювання були проведені експериментальні дослідження на модельному тарілчастому грануляторі за безперервного режиму роботи обладнання.

У результаті раніше проведених робіт було визначено ефективність фосфатної оболонки як мембрани для уповільнення розчинення азотного ядра гранули. З метою поліпшення азотно-фосфорного живлення, підвищення стресостійкості та продуктивності рослин, було запропоновано введення до складу оболонки багатокомпонентного мікроелементного комплексу в хелатній формі «Аватар». У результаті досліджень також визначені оптимальні співвідношення наповнювача покриття та вміст і вид пластифікатора. Окремим циклом робіт була апробація способів внесення добавки мікродобрив у вигляді хелатів до складу оболонки.

Як показали результати досліджень, технологія реалізується з усіма зразками добрив. Найбільш технологічно прийнятним варіантом складу покриття є фосфоритне борошно з можливим внесенням різних добавок у порошкоподібному вигляді та пластифікатор у вигляді гумату калію або кальцію, що дозволяє одержувати добрива з досить широким діапазоном зміни поживних речовин по азоту, фосфору та калію у одній гранулі.

Проведені нами роботи показали, що швидкість розчинення азотної складової гранули добрива залежить від щільності формування частинок фосфатовмісної оболонки. Варіюючи умови процесу її нанесення можливо створювати оболонки з різною проникністю [29, 38-41].

Виконані дослідження по вивченню мікроструктури фосфатовмісного покриття дозволили виявити особливості пористої структури власне оболонки і прошарку між оболонкою та внутрішньою частиною капсульованої гранули. Отримані мікрофотографії дають можливість вивчити розміри пор

фосфатовмісної оболонки і визначити вплив складу пластифікатора на її пористість.

Зразки добрив було отримано наступним чином. На тарілчастий гранулятор на зволожені пластифікатором гранули карбаміду розміром 2–3 мм подавали порошкоподібний фосфат-глауконітовий концентрат у співвідношенні 1:1. Процес капсулювання відбувався за механізмом агломерації протягом 5 хв. Потім отриманий продукт товарною фракцією 2-5 мм був направлений на сушіння протягом 2 годин при температурі 65°C. До складу оболонки четвертого досліджуваного зразка додавали мікроелементний комплекс «Аватар».

Хімічний склад отриманих зразків капсульованого карбаміду наведено в таблиці 2.1.

Таблиця 2.1 – Склад зразків добрив на основі карбаміду в фосфатній оболонці

Назва зразка	Склад			Пластифікатор	Міцність гранул, МПа
	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> , %	N, %	K <sub>2</sub> O, %		
Зразок 1	7,2	23,8	0,31	гумат кальцію	2,1
Зразок 2	7,13	23,6	0,21	гумат калію	2,07
Зразок 3	7,84	21,8	0,42	калімаг	2,09
Зразок 4 з додаванням мікроелементного комплексу «Аватар»	7,4	22,8	0,21	гумат кальцію	1,71

Проведення досліджень з оцінки ефективності фосфатовмісної оболонки з пролонгації розчинення азотного ядра гранули потребує вивчення якісних і кількісних характеристик оболонки та інтерфейсу між зовнішнім та внутрішнім шаром методом скануючої електронної мікроскопії з елементним мікроаналізом. На рис. 2.1 наведений загальний вигляд гранул для чотирьох зразків: а – загальний вигляд гранули при збільшенні ×100, б – поверхня гранули при збільшенні ×1000;

c-загальний вигляд перерізу гранули при збільшенні  $\times 100$ ; d – зріз гранули при збільшенні  $\times 1000$ .

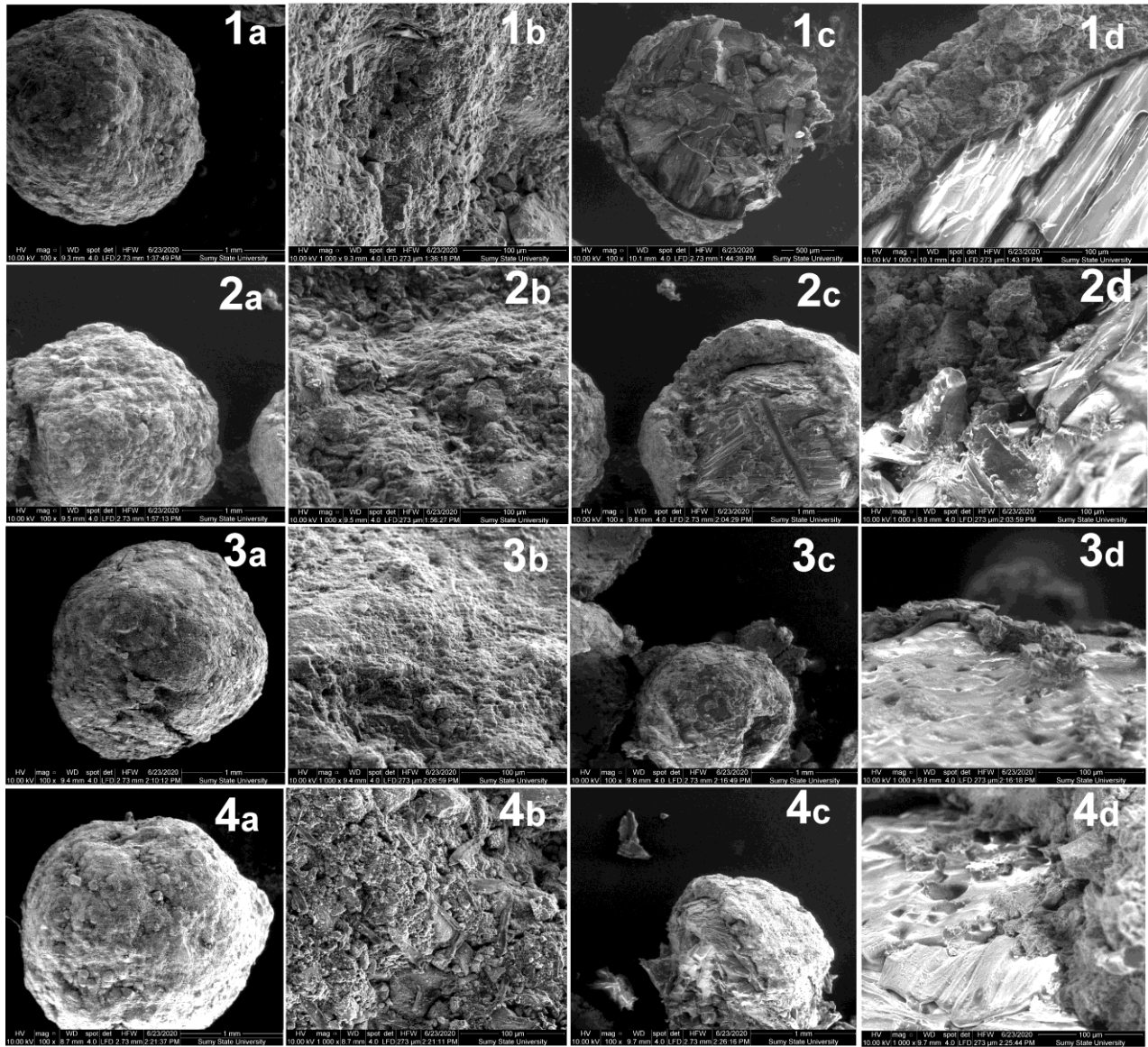


Рисунок 2.1 – Загальний вигляд гранул для зразків 1-4: а – загальний вигляд гранули при збільшенні  $\times 100$ , б – поверхня гранули при збільшенні  $\times 1000$ ; с-загальний вигляд перерізу гранули при збільшенні  $\times 100$ ; д – зріз гранули при збільшенні  $\times 1000$

Дослідження морфології отриманих зразків показало, що зразок 1 є рівномірним за поверхнею, але нерівномірним за товщиною оболонки. Присутні пошкодження оболонки, які, ймовірно, утворились під час сушіння. Поверхня має крупнодисперсні включення. Пориста структура поверхні та всієї оболонки (у

розрізі) розвинена, пори переважно криволінійні. Оболонка не щільно прилягає до окремих ділянок ядра (гранули) внаслідок, ймовірно, виникнення температурних напружень під час сушіння.

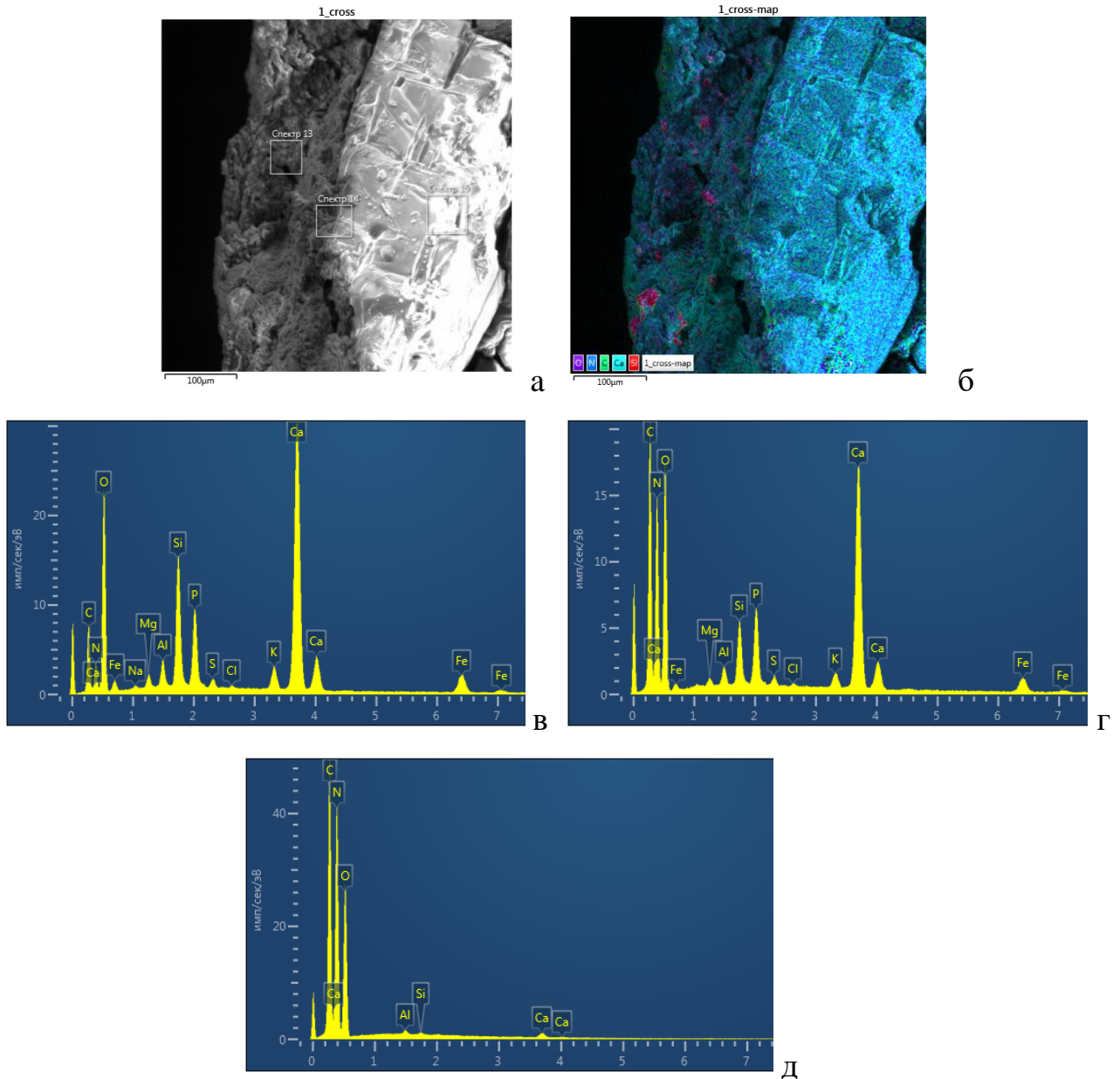


Рисунок 2. 2 – Аналіз елементного складу гранули зразку 1: а – зріз гранули із зонами де проведено аналіз елементного складу, б – розподіл елементів по поверхні зрізу зразку; в – спектр 13; г – спектр 14; д – спектр 15

Аналіз елементного складу показав зростання вмісту С, N в напрямку ядра гранули. Поверхня гранули містить О, Al, Si, P, K, Ca, Fe, Mg, S, Cl, Na – вміст яких зменшується в напрямку від поверхні до середини. Такі елементи як P, K, Fe, Mg, S, Cl, Na у внутрішньому шарі відсутні.

Таблиця 2.2 – Елементний склад шарів гранули комплексного добрива (зразок 1)

Зразок 1	Спектр 13	Спектр 14	Спектр 15
Елемент	Ваг. %	Ваг. %	Ваг. %
C	14,84	20,30	21,59
N	13,20	36,36	46,20
O	40,37	30,32	31,83
Al	0,95	0,35	0,11
Si	4,41	1,10	0,04
P	3,12	1,58	-
K	1,22	0,44	-
Ca	17,26	7,69	0,22
Fe	3,44	1,41	-
Mg	0,55	0,16	-
S	0,38	0,20	-
Cl	0,10	0,07	-
Na	0,16	0,00	-

Зразок 1 представлений карбамідом, капсульованим фосфатовмісною оболонкою із застосуванням пластифікатора – гумата кальцію. Хімічний склад добрива: вміст азоту – 23,8 %,  $P_2O_5$  – 7,2 %,  $K_2O$  – 0,31 %. Міцність гранул становить 2,1 МПа. Мікрофотографії інтерфейсу капсульованого карбаміду і поверхні фосфатовмісної оболонки наведено на рисунку 2.3.

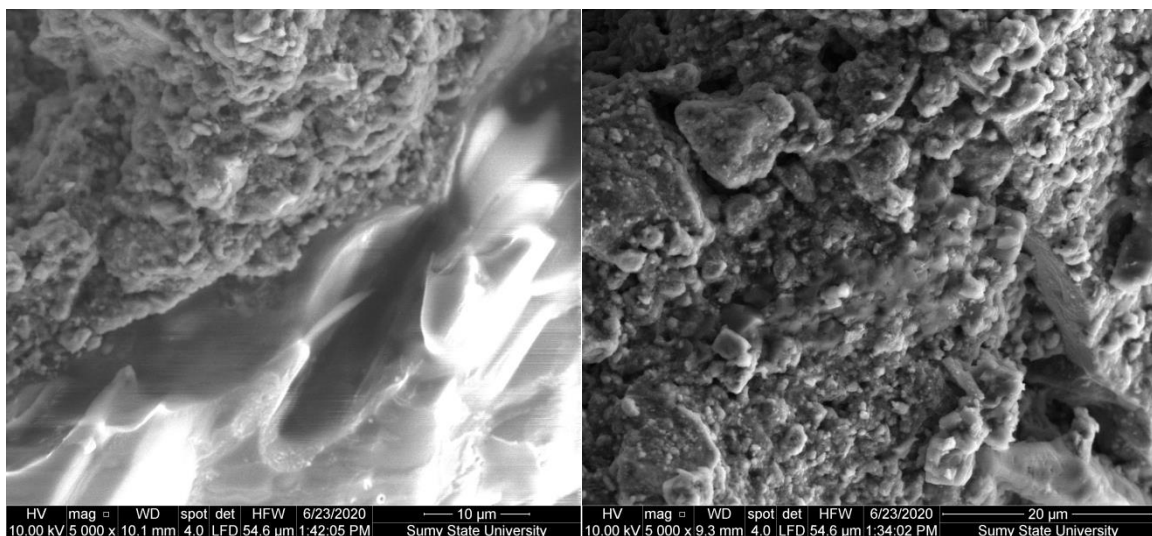


Рисунок 2.3 – Мікрофотографії інтерфейсу і поверхні гранули зразка 1

Дослідження морфології отриманих зразків показало, що зразок 1 є рівномірним за складом покриття. Присутні окремі пошкодження оболонки, які, ймовірно, утворилися при сушінні. Поверхня покриття має крупнодисперсні включення, що пов'язані з полідисперсним складом фосфат-глауконітового концентрату. Поверхня оболонки є досить щільно упакованою. Пориста структура поверхні і всієї оболонки (в розрізі) розвинена, пори, переважно, криволінійні. Оболонка нерівномірно прилягає до окремих ділянок ядра (гранули) внаслідок, ймовірно, температурних напружень, які виникли при сушінні.

Елементний склад оболонки, інтерфейсу і ядра гранули наведено на рисунку 2.4.

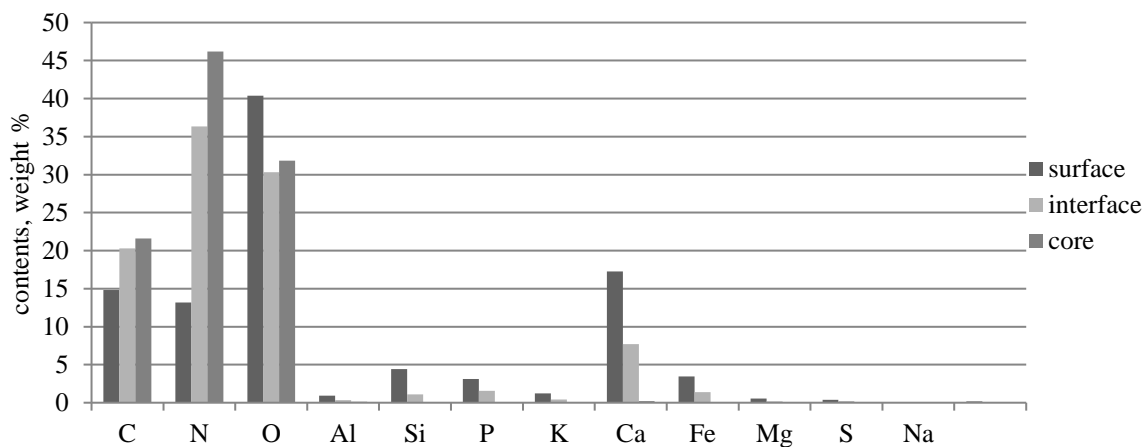


Рисунок 2.4 – Елементний склад оболонки, інтерфейсу і ядра гранули зразка 1

Як випливає з наведеного на рисунку 5 графіка, наявність фосфатної і кальцієвої складової в оболонці є визначальною і підтверджує дані досліджень про те, що основною кристалічною фазою Ново-Амвросіївського фосфат-глауконітового концентрату є фторапатит [42]. Вміст азоту в складі оболонки і на межі поділу фаз, а також силіцію і кальцію в оболонці і в перехідній зоні показує, що при формуванні фосфатовмісної оболонки відбувається взаємопроникнення матеріалу оболонки і ядра гранули з огляду на зволоження поверхні гранули і порошкоподібної суміші пластифікатором. Отже, можна зробити висновок, що кількість нанесеного пластифікатора на поверхню ядра гранули визначає величину адгезії оболонки до гранули карбаміду.

Зразок 2 є рівномірним по поверхні, але має нерівномірну за товщиною оболонку. Порівняно зі зразком 1 товщина оболонки більш рівномірна. Присутні пошкодження оболонки, які, ймовірно, утворились під час сушіння. Поверхня має дрібнодисперсні включення. Пориста структура поверхні та всієї оболонки (у розрізі) нерозвинена: наявні переважно криволінійні пори та пори, які утворились механічно (тріщини, розломи, каверни). Оболонка не щільно прилягає до окремих ділянок ядра (гранули) внаслідок, ймовірно, виникнення температурних напружень при сушінні. Зразок 2 представлений карбамідом, капсульованих фосфатовмісною оболонкою із застосуванням пластифікатора – гумату калію. Хімічний склад добрива: вміст азоту – 23,6 %,  $P_2O_5$  – 7,13 %,  $K_2O$  – 0,21 %. Міцність гранул становить 2,07 МПа.

Дослідження зразка капсульованої добрива з пластифікатором гуматом калію (зразок 2) показує, що структура фосфатовмісної оболонки в цьому зразку є більш розвинутою, з великою кількістю пор, що зумовлює більший розмір пор і, як наслідок, більш швидке розчинення ядра гранули. Поверхня фосфатовмісної оболонки також має дефекти, пов'язані з внутрішньою пористою структурою гранули. Мікрофотографії інтерфейсу капсульованого карбаміду і поверхні фосфатовмісної оболонки наведено на рисунку 2.5.

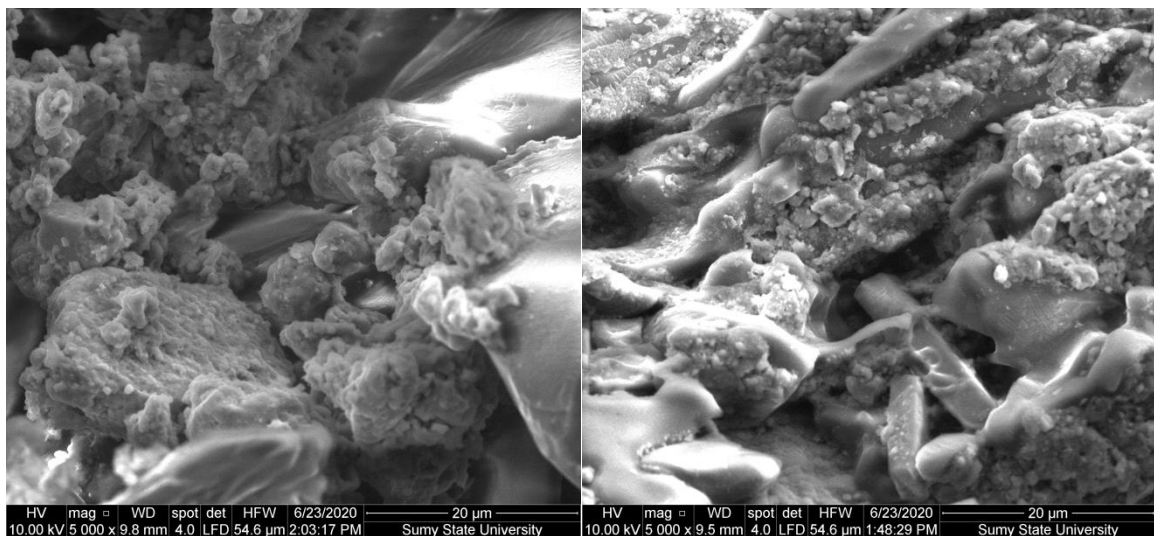


Рисунок 2.5 – Мікрофотографії інтерфейсу капсульованого карбаміду і поверхня фосфатовмісної оболонки зразка 2



Елементний склад оболонки, інтерфейсу і ядра гранули наведено на рис. 2.6.

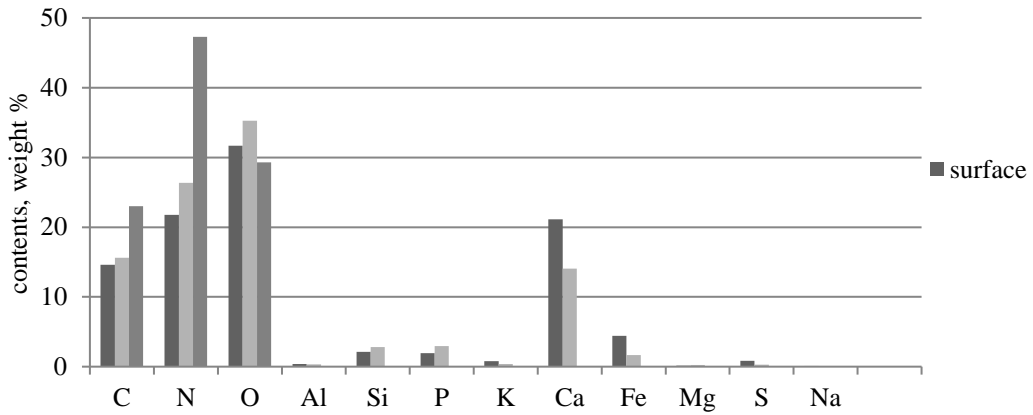


Рисунок 2.6 – Елементний склад оболонки, інтерфейсу і ядра гранули зразка 2

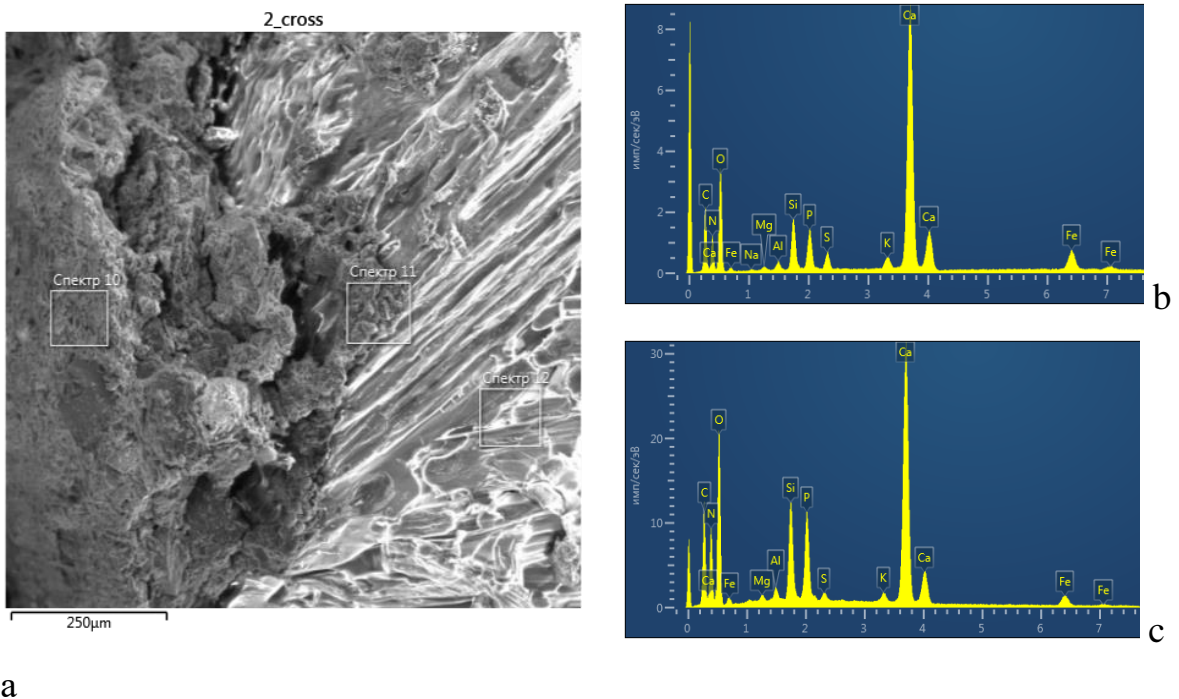


Рисунок 2.7 – Аналіз елементного складу гранули зразка 2:

а – зріз гранули із зонами де проведено аналіз елементного складу;

б – спектр 10; с – спектр 11; d – спектр 12

Як випливає з наведеного графіка (рис. 2.6), наявність фосфатної складової максимальна в зоні інтерфейсу. Вміст азоту в складі оболонки і на межі поділу фаз, а також сильцію і кальцію в оболонці і в перехідній зоні показує, що при формуванні фосфатовмісної оболонки відбувається взаємопроникнення матеріалу оболонки і ядра гранули при зволоженні поверхні гранули і порошкоподібної суміші пластифікатором. Отже, кількість нанесеного пластифікатора на поверхню ядра гранули визначає величину адгезії оболонки до гранули карбаміду.

Аналіз елементного складу показав зростання вмісту С, N в напрямку ядра гранули. Поверхня гранули містить O, Al, Si, P, K, Ca, Fe, Mg, S, Na. Вміст O, Si, P, Mg, Na зростає в інтерфейсі між ядром гранули і оболонкою в порівнянні із вмістом елементів в оболонці. Вміст Al, K, Ca, Fe, S зменшується в напрямку від поверхні до середини. Такі елементи як Al, P, K, Fe, Mg, S, Na у внутрішньому шарі відсутні.

Таблиця 2.3 – Елементний склад шарів гранули комплексного добрива (зразок 2)

Зразок 2	Спектр 10	Спектр 11	Спектр 12
Елемент	Ваг. %	Ваг. %	Ваг. %
C	14,62	15,63	23,03
N	21,77	26,37	47,30
O	31,70	35,26	29,28
Al	0,37	0,35	-
Si	2,13	2,81	0,08
P	1,94	2,93	-
K	0,77	0,39	-
Ca	21,14	14,08	0,02
Fe	4,44	1,67	-
Mg	0,17	0,23	-
S	0,84	0,27	-
Na	0,11	0,00	-
Усього	100,00	100,00	100,00

Зразок 3 має нерівномірну по поверхні та за товщиною оболонку, спостерігаються ділянки, на яких відсутня оболонка (рис. 2.8). Порівняно зі

зразками 1 та 2 товщина оболонки більш рівномірна. Присутні пошкодження оболонки, які, ймовірно, утворились під час сушіння. Поверхня має дрібнодисперсні вclusions. Пориста структура поверхні та всієї оболонки (у розрізі) розвинена та рівномірна у вигляді близько розташованих округлих порожнин. Оболонка не щільно прилягає до окремих ділянок ядра (гранули) внаслідок, ймовірно, виникнення температурних напружень при сушінні.

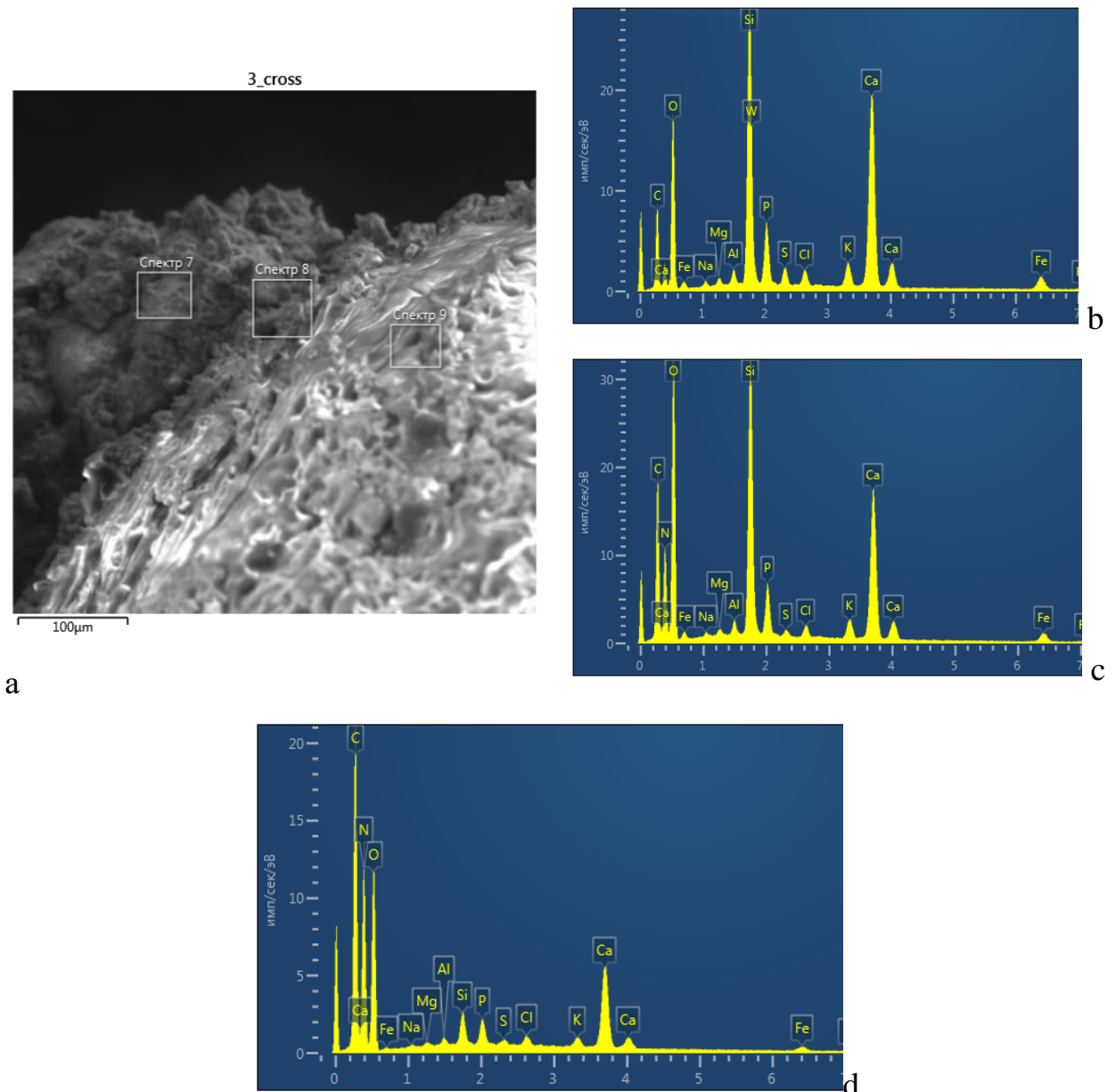


Рисунок 2.8 – Аналіз елементного складу гранули зразку 3: а – зріз гранули із зонами, де проведено аналіз елементного складу; б – 7; с – спектр 8; d – спектр 9

Зразок 3 представлений карбамідом, капсульованим фосфатовмісною оболонкою із застосуванням пластифікатора – 25 % розчину калімагу. Хімічний склад добрива: вміст азоту – 21,8 %,  $P_2O_5$  – 7,84 %,  $K_2O$  – 0,42 %. Міцність гранул становить 2,09 МПа.

Зразок 3 має нерівномірну по поверхні і за структурою оболонку, спостерігаються ділянки, на яких присутні агломерати оболонки. Присутні пошкодження оболонки, які, ймовірно, утворилися при сушінні і формуванні оболонки. Поверхня має дрібнодисперсні і крупнодисперсні включення через полідисперсний склад порошкоподібного концентрату. Пориста структура поверхні і всієї оболонки (в розрізі) розвинена і рівномірна у вигляді близько розташованих округлих порожнин. Оболонка не щільно прилягає до окремих ділянок ядра (гранули) внаслідок, ймовірно, виникнення температурних напружень при сушінні і сформованих агломератів фосфато-глауконітового концентрату. Мікрофотографії інтерфейсу капсульованого карбаміду і поверхню фосфатовмісної оболонки зразка 3 наведено на рисунку 2.9.

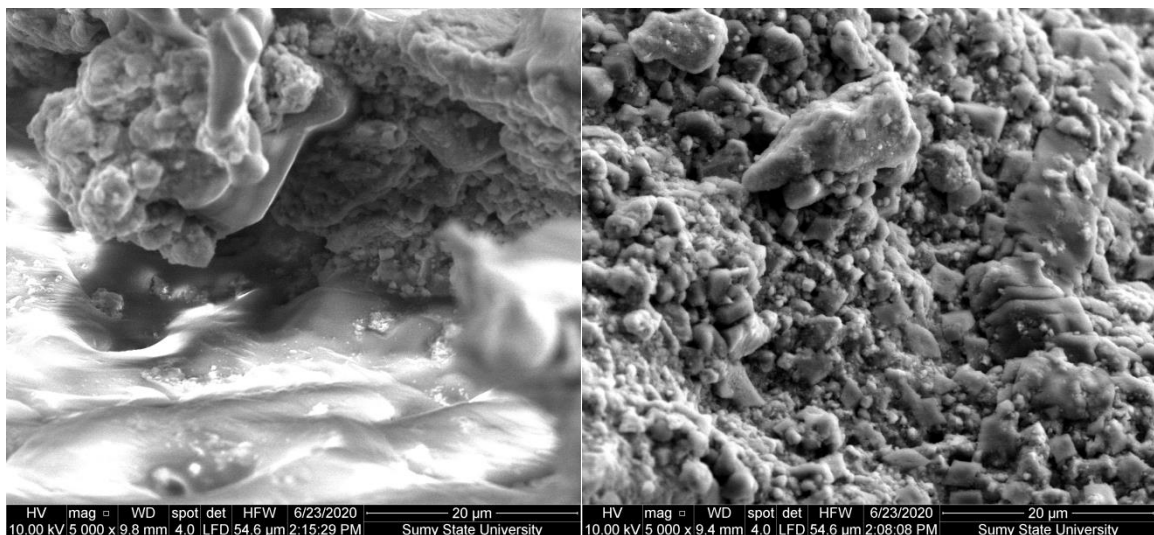


Рисунок 2.9 – Мікрофотографії інтерфейсу капсульованого карбаміду і поверхня фосфатовмісної оболонки зразка 3

Елементний склад оболонки, інтерфейсу і ядра гранули наведено на рисунку 2.10.

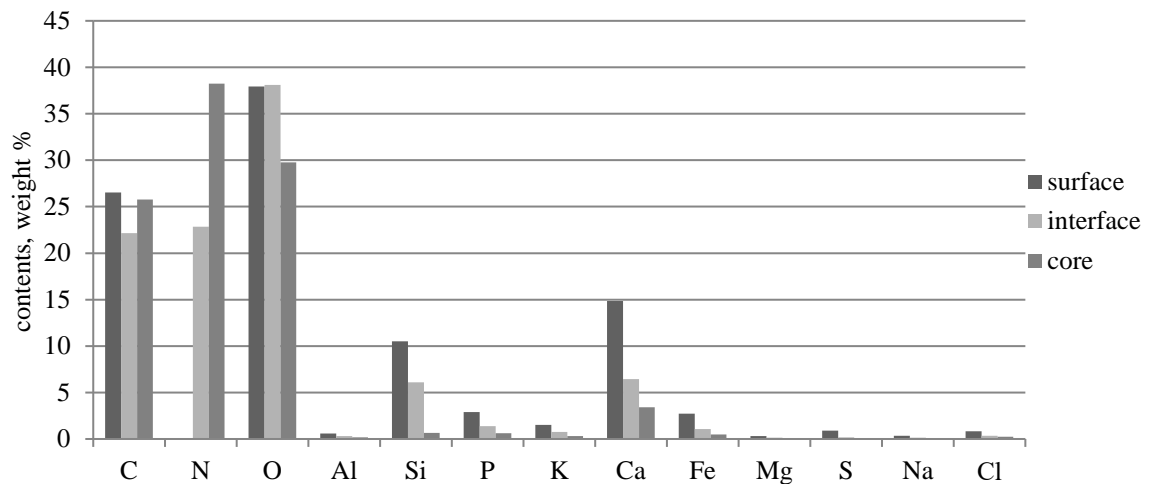


Рисунок 2.10 – Елементний склад оболонки, інтерфейсу і ядра гранули зразка 3

Як випливає з наведеного на рисунку 2.10 графіка, визначальним є наявність фосфатної складової в оболонці. Вміст азоту в складі оболонки і на межі поділу фаз, а також силіцію і кальцію в оболонці і в перехідній зоні показує, що при формуванні фосфатовмісної оболонки відбувається взаємопроникнення матеріалу оболонки і ядра гранули при зволоженні поверхні гранули і порошкоподібної суміші пластифікатором. Наявність калію в пластифікаторі і фосфат-глауконітовому концентраті фіксується, в основному, в складі оболонки.

Аналіз елементного складу показав зменшення вмісту C, O, Al, Si, P, K, Ca, Fe, Mg, S, Na в напрямку ядра гранули, та збільшення вмісту N.

Таблиця 2.4 – Елементний склад шарів гранули комплексного добрива (зразок 3)

Зразок 3	Спектр 7	Спектр 8	Спектр 9
Елемент	Ваг. %	Ваг. %	Ваг. %
1	2	3	4
C	26,54	22,17	25,78
N	-	22,83	38,26
O	37,94	38,11	29,76
Al	0,59	0,32	0,16
Si	10,52	6,10	0,66
P	2,89	1,37	0,62
K	1,53	0,75	0,33

## Продовження таблиці 2.4

1	2	3	4
Ca	14,86	6,45	3,42
Fe	2,72	1,07	0,48
Mg	0,33	0,15	0,09
S	0,91	0,17	0,12
Na	0,34	0,14	0,08
Cl	0,83	0,36	0,26
Усього	100,00	100,00	100,00

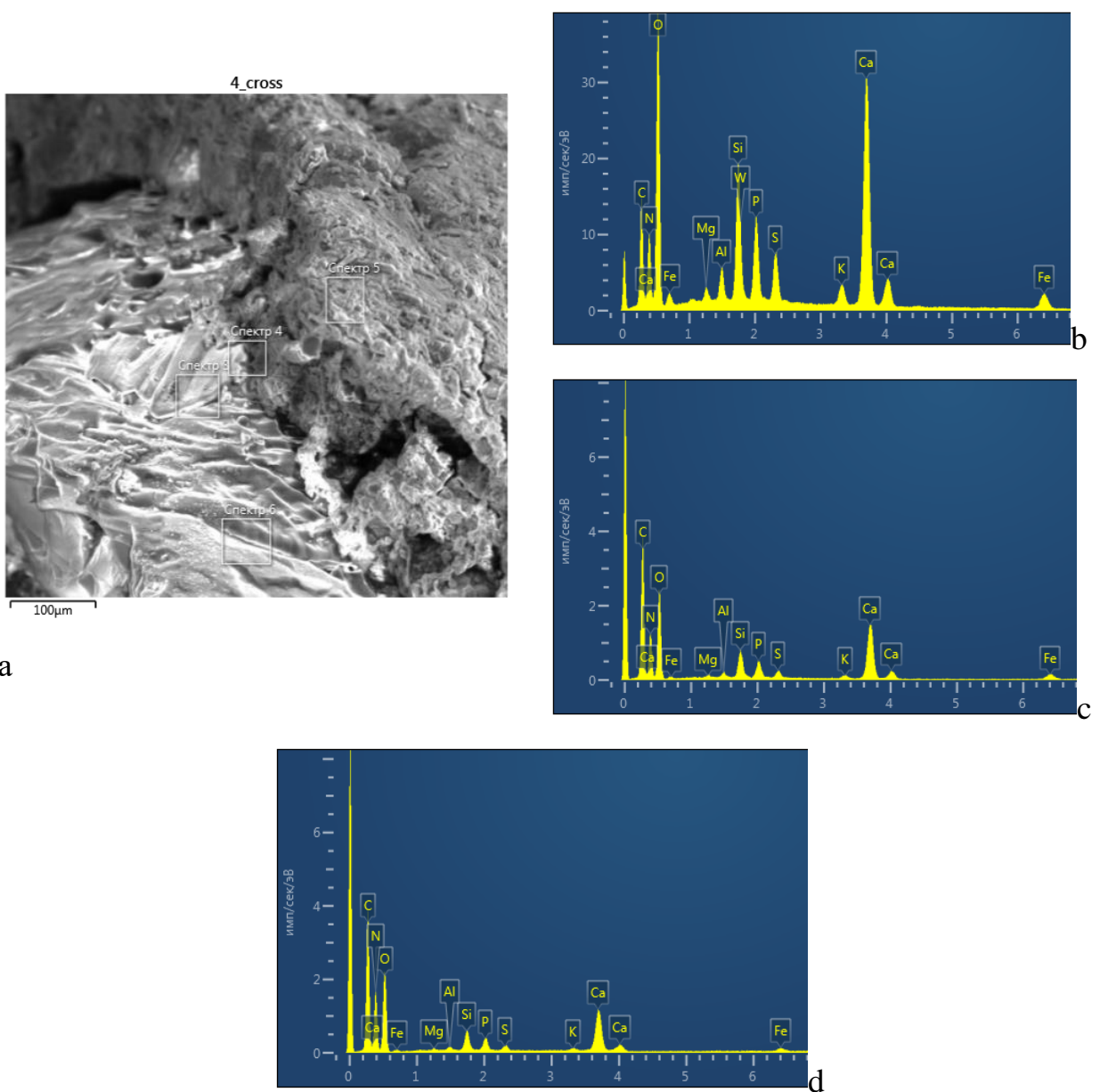


Рисунок 2.11 – Аналіз елементного складу гранули зразку 4:

а – зріз гранули із зонами де проведено аналіз елементного складу;

b – спектр 3; c – спектр 4; d – спектр 5

Зразок 4 є рівномірним по поверхні, але має нерівномірну за товщиною оболонку (рис. 2.11). Пошкодження оболонки, які, ймовірно, утворились під час сушіння, майже відсутні. Поверхня має крупнодисперсні включення. Пориста структура поверхні та всієї оболонки (у розрізі) розвинена, пори переважно криволінійні. Оболонка не щільно прилягає до окремих ділянок ядра (гранули) внаслідок, ймовірно, виникнення температурних напружень при сушінні.

На всіх зразках поверхня гранули має пошкодження різного характеру, які виникли під час видалення вологи у сушильній шафі. Ці пошкодження разом з утвореною пористою структурою дають можливість проникнення вологи всередину оболонки та її розчинення у ґрунті. Однак, крупні пошкодження можуть спричинити відшарування оболонки від ядра гранули під час транспортування, а також завчасне розчинення оболонки у ґрунті внаслідок великої кількості вологи, яка надійде до оболонки. Додаткове руйнування оболонки може бути спричинене нещільним приляганням оболонки до ядра гранули.

Таблиця 2.5 – Елементний склад шарів гранули комплексного добрива (зразок 4)

Зразок 4	Спектр 5	Спектр 4	Спектр 3
Елемент	Ваг. %	Ваг. %	Ваг. %
C	15,97	29,61	27,93
N	19,76	28,32	45,42
O	42,06	31,89	30,91
Al	0,88	0,25	0,16
Si	3,32	1,32	0,99
P	2,40	0,98	0,75
S	1,45	0,30	0,30
K	0,83	0,27	0,20
Ca	10,75	5,52	4,14
Fe	2,08	1,40	0,09
Mg	0,41	0,13	0,11
W	0,10	-	-
Всього	100,00	100,00	100,00

Зразок 4 представлений карбамідом, капсульованим фосфатовмісною оболонкою із застосуванням пластифікатора гумата кальцію, в який у кількості 0,3 % від маси гранули введений мікроелементний комплекс у хелатній формі «Аватар». Хімічний склад добрива: вміст азоту – 22,8 %,  $P_2O_5$  – 7,4 %,  $K_2O$  – 0,21 %. Міцність гранул становить 1,71 МПа. Мікрофотографії інтерфейсу капсульованого карбаміду і поверхні фосфатовмісної оболонки наведено на рисунку 2.12.

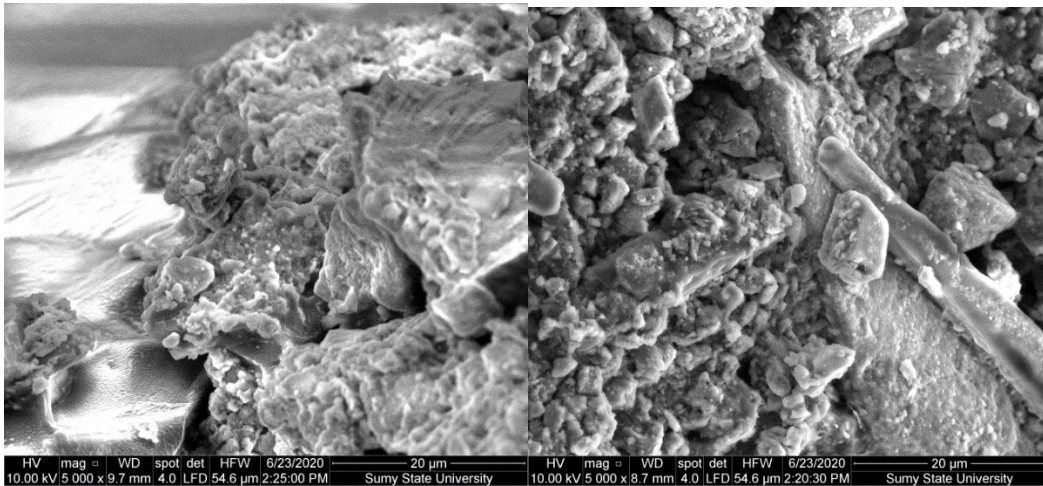


Рисунок 2.12 – Мікрофотографії інтерфейсу капсульованого карбаміду і поверхні фосфатовмісної оболонки зразка 4

Елементний склад оболонки, інтерфейсу і ядра гранули наведено на рис. 2.13.

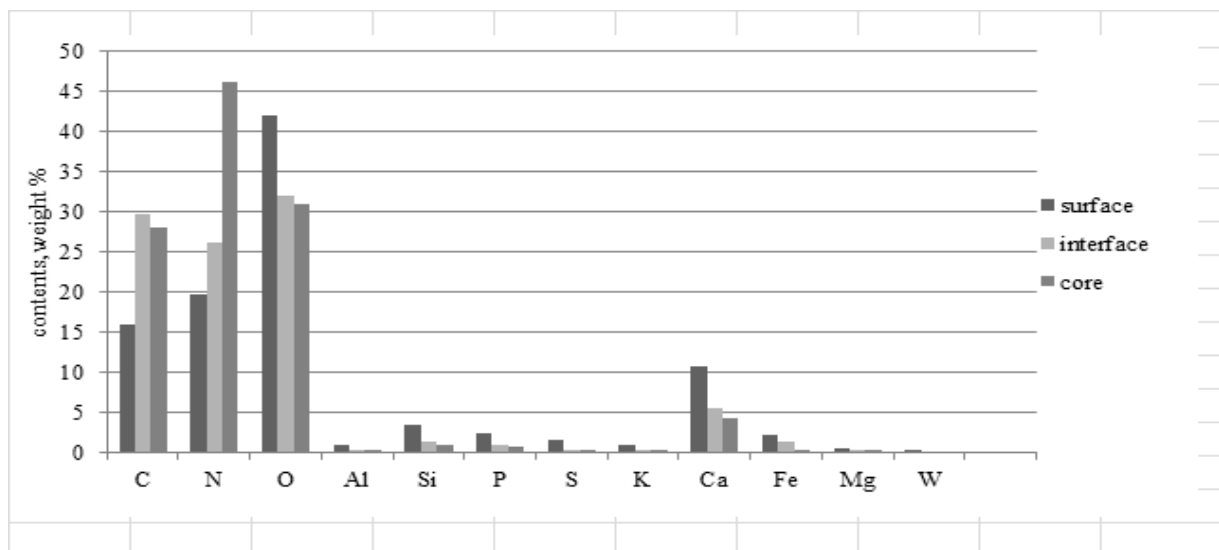


Рисунок 2.13 – Елементний склад оболонки, інтерфейсу і ядра гранули зразка 4



Наведений на рисунку 2.13 графік підтверджує наявність фторапатиту в складі фосфатовмісної оболонки. Вміст азоту в складі оболонки і на межі поділу фаз, а також силіцію і кальцію в оболонці і в перехідній зоні показує, що при формуванні фосфатовмісної оболонки відбувається взаємопроникнення матеріалу оболонки і ядра гранули при зволоженні поверхні гранули і порошкоподібної суміші пластифікатором. Наявність калію в пластифікаторі і фосфат-глауконітовому концентраті фіксується, в основному, в складі оболонки.

Рівномірність товщини оболонки на гранулі не є визначальним фактором, який впливає на якість добрива. На кожній гранулі нанесено необхідну (відповідно до технологічного розрахунку) кількість концентрату. При цьому основними показниками якості є:

- міцність капсульованої гранули, для добрив не менше 1 МПа;
- щільність прилягання оболонки до гранули і адгезія оболонки з поверхнею гранули, яка підтверджується хімічним аналізом оболонки, інтерфейсу і ядра гранули, а також міцністю самої капсульованої гранули;
- розвинена пориста структура оболонки з мінімальною кількістю механічних пошкоджень поверхні, викликаних термічними напруженнями при сушінні, що необхідно врахувати при розробці технології і температурних режимів сушіння.

Поверхня зразка 4 є рівномірною, але має крупнодисперсні включення, пов'язані полідисперсністю складу порошкоподібного концентрату. Пошкодження оболонки, які утворилися під час сушіння, майже відсутні. Пориста структура поверхні і всієї оболонки (в розрізі) розвинена, пори переважно криволінійні. Оболонка на окремих ділянках контакту нещільно прилягає до окремих ділянок ядра (гранули) внаслідок, ймовірно, виникнення температурних напружень при сушінні. Зниження статичної міцності зразка 4, в порівнянні зі зразками 1, 2, і 3 може бути викликано нещільним приляганням оболонки до ядра гранули.

Виконані технологічні та аналітичні дослідження з оцінки якості формування фосфатовмісної оболонки показують, що переважний розмір пір

покриття – мікрометровий діапазон, однак по радіусу оболонки спостерігаються пори нанометрового діапазону, присутність яких дозволяє збільшити рівномірність розчинення добрива. Наявність нанопор малих розмірів дозволяє зменшити швидкість розчинення добрива в ґрунті (створити добрива пролонгованої дії), а також керувати часом розчинення за рахунок варіації відносної кількості нанопор в оболонці гранули і товщини оболонки [30-35]. Слід також зазначити, що нанопори в меншій мірі схильні до руйнування при сушінні завдяки незначній кількості вологи в них. За рахунок пропорційності нанопор і молекул води отримане добриво дозволяє зменшити непродуктивні витрати азоту добрива. Зменшення швидкості дифузії азотної частини ядра гранули за рахунок більш повільного розчинення фосфатної і калійної складової оболонки фактично перешкоджає виникненню небезпеки передозування добрив в ґрунті. Аналіз мікрофотографій дозволяє також зробити висновок про суттєвий вплив технологічних режимів агломерації і сушіння отриманого продукту.

Проведені дослідження [25-29, 32-37]. показали можливість нанесення фосфатовмісної оболонки на гранули карбаміду методом агломерації з одержанням капсульованого добрива з достатніми для їх застосування характеристиками. Найбільш технологічним пластифікатором є гумат кальцію, який модифікований мікроелементним комплексом в хелатній формі. Початковий розмір пор фосфатовмісної оболонки на границі ядра і оболонки складає 10 мкм.

### 3 ЕКОЛОГО-ЕКОНОМІЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ ЗАПРОПОНОВАНИХ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ОСНОВ КАПСУЛЮВАННЯ ДОБРИВ

У зв'язку з підвищенням агрогенного навантаження на довкілля, сільськогосподарському виробництву необхідні екологічно безпечні добрива. Це дозволяє вирішувати питання підвищення агрономічної та економічної ефективності добрив при одночасному зменшенні негативних наслідків їх використання. Обов'язковою умовою екологізації сільського господарства є еволюційний перехід до прогресивної системи біосферного землекористування, адаптованого до умов довкілля.

На сьогодні на ринку України присутні такі види мінеральних добрив: азотні, фосфорні, калійні та комплексні, які мають перевагу у застосуванні (табл.3.1).

Таблиця 3.1 – Структура виробництва і споживання мінеральних добрив у 2015 р (за даними Черкаського ДП «НІТЕХІМ)

Найменування добрив	Об'єм виробництва, тис. т	Експорт тис. т	Імпорт тис. т	Внутрішнє споживання тис. т	Внутрішнє споживання, %	
					Вітчизняна продукція, %	Імпортна продукція, %
Азотні (100 % N)	1638,6	879,4	317,7	1076,9	70,0	30,0
Фосфорні (100% P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> )	2,1	0,0	2,8	4,9	43,0	57,0
Калійні (100 % K <sub>2</sub> O)	4,46	2,28	81,3	83,48	97,0	3,0
Комплексні і змішані (ф.в.)	250,0	25,4	1200,9	1425,5	15,8	84,2

Внесення азотних добрив, які займають у системах удобрення сільськогосподарських рослин важливе місце, дозволяє, окрім підвищення

врожайності сільськогосподарських культур, частково компенсувати зниження природної родючості ґрунтів. Але їх надмірна кількість, як необхідних на початку вегетаційного періоду, може мати негативний вплив на довкілля через значні втрат азоту у вигляді газоподібного  $N_2$ , в ґрунтові води і до ґрунту у вигляді нітратів, які можуть накопичуватися в сільськогосподарських продуктах [43, 44 , 45].

Ефективне використання азоту добрив можливе лише при одночасному внесенні інших поживних речовин (фосфору, калію, окремих мікроелементів та органіки) [5, 6], що може також призвести до підвищення кислотності ґрунту [46], агрогенного забруднення ґрунтів важкими металами (ВМ), арсеном і радіоактивними елементами.

Водночас, зі збільшенням доз внесення добрив коефіцієнт використання, наприклад, азоту, зменшується, а втрати як абсолютні, так і відносні, ростуть (табл. 10) [47].

Таблиця 3.2 – Втрати поживних речовин з ґрунту у довкілля при внесенні високих доз добрив, кг/га

Внесення поживних речовин	Суглинковий ґрунт			Супіщаний ґрунт		
	N	K <sub>2</sub> O	CaO	N	K <sub>2</sub> O	CaO
Без добрив	4,8	4,0	35,8	8,1	2,7	61,2
N <sub>340</sub> P <sub>340</sub> K <sub>300</sub>	27,8	23,2	180	72,3	29,4	24,7

Численні дослідження підтверджують, що у зв'язку зі швидкою трансформацією азоту добрив у ґрунті його втрати в газоподібній формі можуть досягати 25 %, а вертикальна і горизонтальна міграція обумовлює забруднення ґрунтових і поверхневих вод нітратної формою. Як свідчать дані таблиці 10, ґрунти також мають значні втрати кальцію.

Ключовою вимогою розробки нових форм добрив повинен бути їх мінімальний вплив на довкілля при максимальній корисності для рослин, оскільки

відомо, що винос поживних елементів із ґрунту з урожаєм рослин досягає значних величин (табл. 3.3) [48].

Таблиця 3.3 – Винесення поживних речовин сільськогосподарськими культурами на 1 ц продукції, кг

Урожай		Культура				
		пшениця	ячмінь	кукурудза	соняшник	ріпак
Біологічний	N	2,89	2,47	2,41	4,28	6,50
	P	1,00	1,09	0,86	1,72	2,40
	K	2,07	2,26	2,24	10,43	4,20
Основна продукція	N	2,07	1,68	1,53	2,37	4,63
	P	0,74	0,74	0,59	1,04	1,73
	K	0,49	0,49	0,42	0,84	1,26
Побічна продукція	N	0,51	0,54	0,69	0,87	0,70
	P	0,16	0,19	0,21	0,31	0,25
	K	0,99	1,17	1,42	4,36	1,10
Середньозважене відношення побічної продукції до основної		1,6	1,3	1,3	2,22	2,67

Для зменшення деструктивного впливу мінеральних добрив на довкілля і підвищення ефективності їх використання пропонується екологічна інновація, характеристики якої можна змінювати відповідно до потреб споживачів. За основу такого нововведення розглядається технологія отримання складних органо-мінеральних NPK-добрив шляхом капсулювання гранули карбаміду фосфатно-калійною оболонкою з добавками мікроелементів і гуматів. Основними завданнями такої оболонки є вивільнення азотних і фосфатних поживних речовин з гранул у ґрунт відповідно до агрохімічних потреб рослин і запобігання надходження забруднюючих речовин в ґрунт [49, 50].

Попередня оцінка ринкових перспектив такої інновації показує високий рівень її ринкової привабливості для всіх учасників ринку: виробників, споживачів і суспільства. Проведений орієнтовний розрахунок екологічної та

економічної ефективності виробництва і застосування напівсухого методу отримання добрива з порошоків фосфориту і карбаміду, капсульованого органо-мінеральною фосфатовмісною оболонкою, показав, що зменшення вологості фосфатовмісного покриття з 50 % до 12 % дозволяє зменшити енергетичні витрати на отримання добрива і теплове забруднення довкілля на 70 % у порівнянні з методом отримання гранул з розчинів. При цьому споживання природного газу і, відповідно, пилогазові викиди при виробництві добрив напівсухим методом (нанесення фосфатовмісного покриття) можуть бути знижені в 3 рази. А зменшення пило-газових викидів, оцінено через викиди парникових газів CO<sub>2</sub> при такому безкислотному методі і дорівнює 57 євро на 1 т добрива [42].

Розрахунок екологічної та економічної ефективності застосування в сільському господарстві карбаміду, капсульованого органо-мінеральною фосфатовмісною оболонкою, показав, що за рахунок зменшення газоподібних втрат азоту внесених добрив, можна очікувати зниження викидів закису азоту з ґрунтів у перерахунку на CO<sub>2</sub> = 1,24 т CO<sub>2</sub> з 1 га ріллі. Або в грошовому вираженні близько 800 грн/га [51]. Дані розрахунки будуть просто необхідні в найближчому майбутньому у зв'язку з вимогами екологічних служб щодо зниження викидів парникових газів з ріллі.

Ефективність виробництва капсульованого органо-мінерального добрива можна оцінити в загальному вигляді коефіцієнтом екологічності [52], який визначається як різниця між вартістю сировини, яку можна прийняти за 1, і вартістю відходів, що утворилися при переробці сировини:

$$K_e = (1 - B) \quad (3.1)$$

Коливання значення  $K_e$  в межах від 0,9 до 1 вказує на високу ефективність виробництва і низький рівень забруднення довкілля. Напівкількісний порівняльний аналіз кислотних методів одержання складних мінеральних добрив з виділенням значної кількості фосфогіпсу у якості відходів виробництва та одержання таких добрив безкислотним методом з втратами тільки пилу сировини

не більше 10%, дозволяє звести показник «В» до мінімуму і отримати підвищення коефіцієнту екологічності. Отже, такі добрива за показником екологічної безпеки можна віднести до екологічно безпечних.

Визначення пролонгуючої дії розроблених добрив, що капсульовані фосфатовмісним покриттям з різним складом оболонки, ефективність пролонгації складових добрив оцінювали за зниженням швидкості вимивання рухомих поживних речовин за профілем ґрунту та впливом компонентів покриття нових видів добрив на швидкість вимивання поживних речовин та токсикантів із орного шару ґрунту у відповідності до методики, яка викладена в дослідженнях [3, 42].

Відповідно до методики [53] визначено екологічний ефект зменшення викидів закису азоту при застосуванні капсульованих мінеральних добрив. Відомо, що загальна невизначеність оцінки викидів  $N_2O$  від сільськогосподарських земель, на сьогодні складає 87 %. Невизначеності у оцінках викидів  $N_2O$  від сільськогосподарських земель пов'язані з обмеженою кількістю відомостей про сільськогосподарську діяльність та коефіцієнтів викидів та відсутності точних співвідношень між прямими та непрямими викидами. Водночас, кумулятивні потоки  $N_2O$  з орних ґрунтів при вирощуванні різних сільськогосподарських культур варіюються від 0,2–2,8 кг/ га протягом п'яти вегетаційних сезонів в залежності від їх сорту.

З урахуванням викладеного в роботі [54] допускаються, приймаються викиди закису азоту з орних ґрунтів при вирощуванні сільськогосподарських культур  $k_{\text{вик}} = 0,2$  кг/га.

Спираючись на фактичні результати агрохімічних мікропольових випробувань і лабораторних досліджень процесів вимивання азотних добрив, є можливість достовірно оцінити зниження викидів закису азоту при внесенні нових форм добрив, що буде відповідати збільшенню урожайності сільськогосподарських культур при застосуванні добрив із покриттям у порівнянні зі стандартними добривами.

Викиди закису азоту (В) в результаті внесення азотних добрив розраховуються за методикою ефективної практики їх внесення шляхом

збільшення даних [55] про кількість внесених азотних добрив у ґрунт, скорегована з урахуванням втрат азоту у вигляді  $\text{NH}_3$  і  $\text{NO}_x$  ( $k_{\text{кор}}$ ) і коефіцієнту викидів ( $k_{\text{вик}}$ ):

$$B = f(\Delta W^1) \cdot k_{\text{кор}} \cdot k_{\text{вик}}, \quad (3.2)$$

де  $\Delta W^1$  – збільшення врожайності сільськогосподарських культур при застосуванні добрив з покриттям порівняно зі стандартними добривами.

Екологічний ефект зменшення викидів закису азоту з 1 га при застосуванні мінеральних добрив із покриттям визначається за формулою

$$E_{\text{екол}} = c \cdot B \cdot n, \quad (3.3)$$

де  $c$  – вартість викидів 1 тонни  $\text{CO}_2$ , грош. од;

$n$  – площа землі, га;

$B$  – зменшення викидів закису азоту з 1 га [53].

Відповідно до методики [54, 56], за допомогою коефіцієнта екологічності проведено визначення екологічної безпеки при використанні розроблених видів капсульованих добрив на посівних площах:

$$k_{\text{е.н.}} = k_{\text{ф.з.}} / k_{\text{н.н.}}, \quad (3.4)$$

де  $k_{\text{е.н.}}$  – коефіцієнт екологобезпечного навантаження забруднюючих речовин (мінеральних добрив) на земельні угіддя (посівні площі);

$k_{\text{ф.з.}}$  – показник фактичної навантаження забруднюючих речовин (мінеральних добрив) на земельні угіддя (посівні площі), кг/га;

$k_{\text{н.н.}}$  – норматив навантаження забруднюючих речовин (мінеральних добрив) на земельні угіддя, який приймається на рівні 60 кг/га.

Навантаження забруднюючих речовин за внесення мінеральних добрив на ґрунт визначається за таблицею 3.4.



Таблиця 3.4 – Визначення екологічного навантаження забруднюючих речовин

Межа значень коефіцієнта	Значення коефіцієнта екологічного навантаження			
	$k_e < 1,0$	$1,0 < k_e < 2,5$	$2,6 < k_e < 4,0$	$k_e > 4,0$
Навантаження забруднюючих речовин	Екологічно безпечне	Екологічно допустиме	Екологічно небезпечне	Критичне

Джерело: [56]

Зважаючи на те, що елементи важких металів добрив відносяться до першого класу небезпечності «високо небезпечні», то доцільно розрахувати коефіцієнт небезпеки елемента-забруднювача ( $K_{нб}$ ) [57]:

$$K_{нб} = C_i / ГДК_i \leq 1, \quad (3.5)$$

де  $C_i$  – концентрація і-тої забруднюючої речовини, мг/кг;

$ГДК_i$  – гранично допустима концентрація і-тої забруднюючої речовини, мг/кг.

За нормальних умов коефіцієнт небезпеки має дорівнювати 1 або бути меншим. Для сільськогосподарського виробництва найбільшу небезпеку являють рухомі форми важких металів, оскільки саме вони є легкодоступними для рослин [57].

Основні ідеї, які мають бути покладені в пропозиції щодо розробки нових марок добрив:

- Більш повне використання поживних елементів добрива при зниженні його непродуктивних втрат;
- Комплексний склад добрива, що складається з необхідних для рослини елементів живлення і підживлення на весь період вегетації;
- Необхідна умова – створення органо-мінерального комплексу;
- Мінімальний вплив на довкілля при виробництві і застосуванні добрив;
- Мінімізація виробничих витрат при виробництві та використанні добрив.

Отже, спираючись на вимоги до перспективних видів добрив, і, відповідно до вибраного напрямку досліджень, можна зробити висновок про перспективність розробки складно-змішаних органо-мінеральних капсульованих форм карбаміду для основного внесення. Дане технічне рішення обґрунтовується можливістю отримувати не тільки капсульовані гранули карбаміду з внесенням в оболонку різних модифікаторів, але і в цілому NPK-добрива напівсухим методом, що економічно і екологічно ефективно при їх виробництві і застосуванні.

## 4 МАРКЕТИНГОВЕ ДОСЛІДЖЕННЯ РИНКУ ЕКОЛОГІЧНОЇ ІННОВАЦІЇ

### 4.1 Оцінка ринкових перспектив задуму нового товару, прогнозування життєвого циклу інновації (зокрема, етапів інноваційного та кастомізаційного циклів)

Дослідження ринку доцільності реалізації екологічно орієнтованого інноваційного проекту проведено відповідно до запропонованого автором алгоритму прийняття рішень щодо обґрунтованості бізнес-проекту [58], що дозволяє зменшити інвестиційний ризик на початкових етапах та підвищити точність прогнозованих оцінок на етапі бізнес-аналізу (рис. 4.1, рис. 4.2). Для оцінки інноваційного потенціалу підприємства був використаний метод вимог та можливостей:, розглянутий у роботі [59].

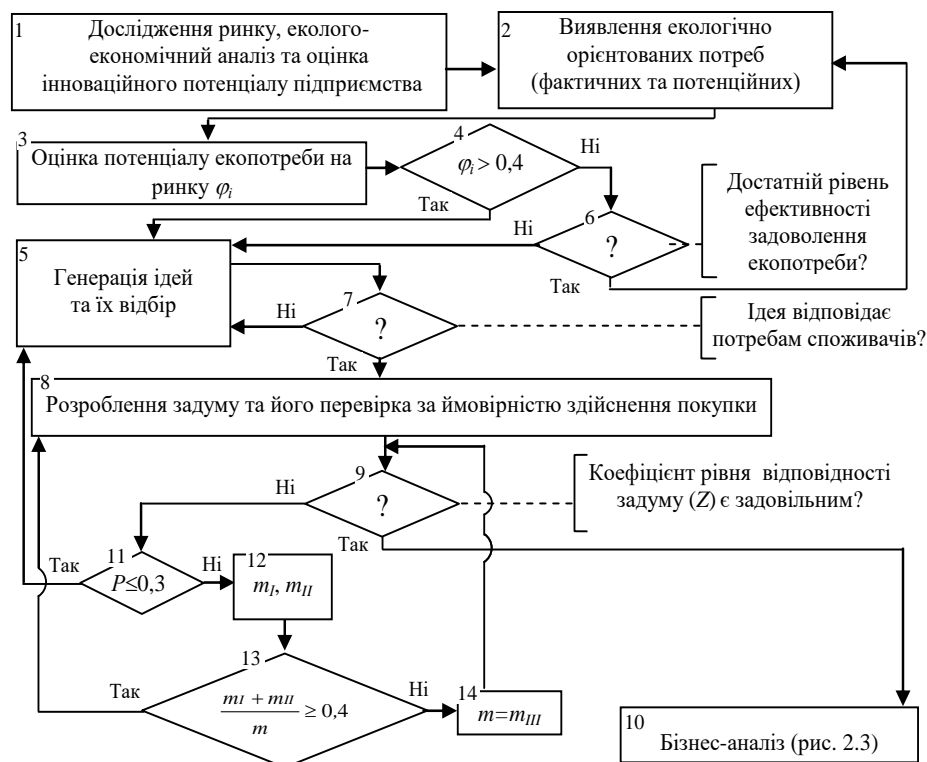


Рисунок 4.1 – Блок-схема алгоритму прийняття управлінських рішень на аналітично-пошуковому етапі [58]

Для аналізу екологічно орієнтованого інноваційного проекту на початкових етапах пропонується використовувати показники: рівень незадоволення екологічно орієнтованої потреби (або потенціал потреби) ( $\varphi_i$ ); ймовірність ( $P$ ) придбання потенційної екологічної інновації споживачами з урахуванням їх розподілу за групами  $m_I$  ( $P_I=0$ ),  $m_{II}$  ( $0 < P_{II} \leq 0,25$ ),  $m_{III}$  ( $P_{III} > 0,25$ ),  $m = m_I + m_{II} + m_{III}$ ; рівень адекватності задуму запитам споживачів ( $Z$ ).

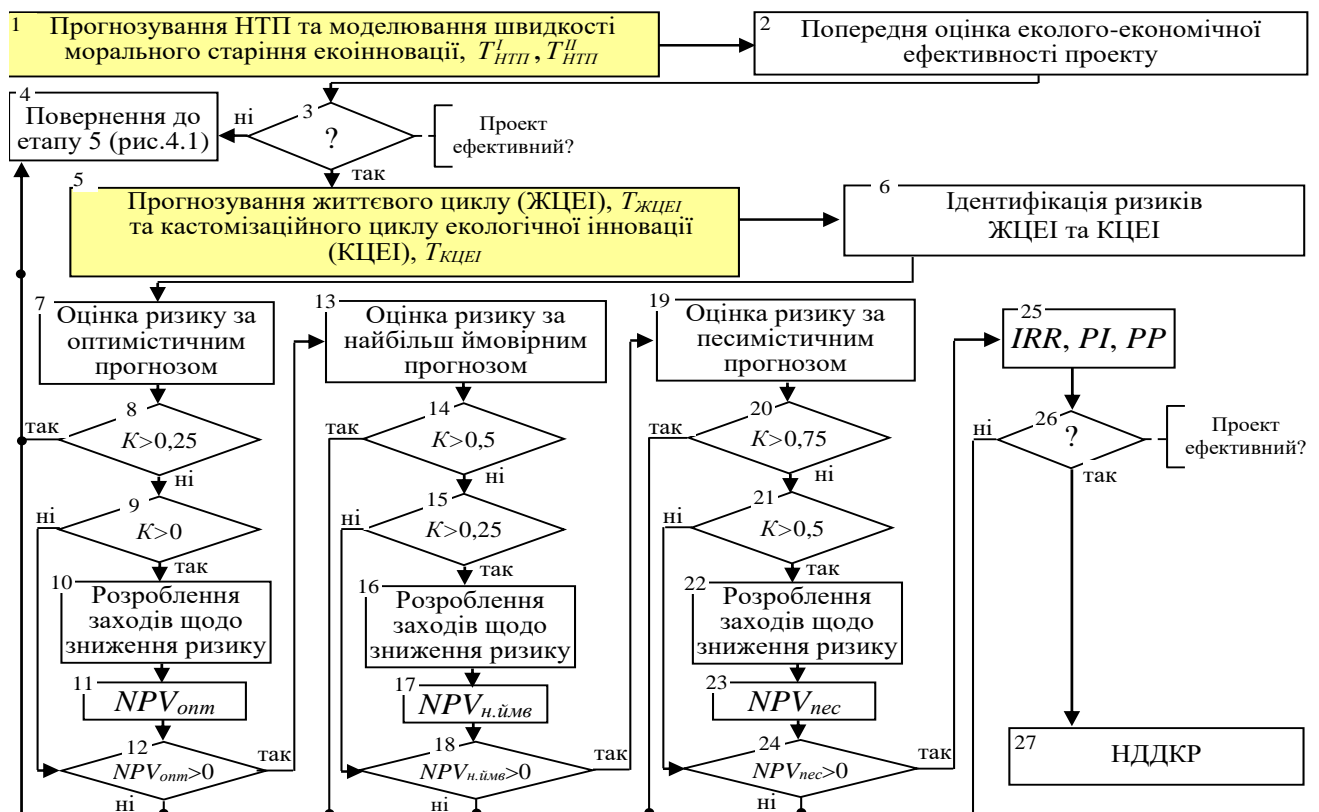


Рисунок 4.2 – Блок-схема алгоритму прийняття рішень на етапі бізнес-аналізу (удосконалено автором на основі [58])

Рівень незадоволення певної екологічно орієнтованої потреби (або потенціал потреби) розраховується за формулою (4.1):

$$\varphi_i = 1 - \frac{P_{pi}}{P_{ci}}, \quad (4.1)$$

де  $\varphi_i$  – рівень незадоволення екологічно орієнтованої потреби  $i$  (або потенціал

потреби), відн.од.;

$P_{ci}$  – сукупна екологічно орієнтована ринкова (фактична, потенційна) потреба  $i$ , нат.од.;

$P_{pi}$  – показник реального (фактичного, потенційного) задоволення екологічно орієнтованої потреби  $i$ , нат.од.

Відповідно до отриманої оцінки за таблицею прийняття рішень (табл. 4.1) роблять висновок про ринкову доцільність проведення робіт у цьому напрямку.

Рівень ефективності задоволення екологічно орієнтованої потреби визначається експертним методом на основі оцінки способів (засобів), якими вони задовольняються.

Таблиця 4.1. – Потенціал екологічної потреби на ринку [58]

Значення показника $\varphi_i$	Потенціал потреби	Характеристика
$\varphi_i = 1$	Абсолютний	Відсутність способів (засобів) задоволення потреби сприяє активізації діяльності виробника щодо створення радикальних та ординарних екологічних інновацій. Проект є дуже ризиковим, однак за умови успішної його реалізації виробник отримує позицію лідера на ринку
$0,8 \leq \varphi_i < 1$	Високий	Досить висока привабливість проекту, успішна реалізація якого дозволить виробнику зайняти міцну ринкову позицію – слід продовжувати роботу у цьому напрямку
$0,6 \leq \varphi_i < 0,8$	Достатній	Проект є досить привабливим – доцільно продовжувати роботу у цьому напрямку
$0,4 \leq \varphi_i < 0,6$	Середній	Існує певний ризик. Швидше за все слід продовжувати роботу у цьому напрямку. Доцільність реалізації проекту в цілому визначається на етапі бізнес-аналізу
$0,2 \leq \varphi_i < 0,4$	Низький	Існує певна доцільність подальших робіт у цьому напрямку за умови недостатнього рівня ефективності задоволення потреби – можливо слід відмовитися від проекту
$0 \leq \varphi_i < 0,2$	Критичний	Можливість подальших робіт у цьому напрямку визначається рівнем ефективності задоволення потреби – швидше за все слід відмовитися від проекту
$\varphi_i = 0$	Нульовий	Потреби ринку задоволені повною мірою, рівень конкуренції дуже високий. Можливість подальших робіт у цьому напрямку визначається рівнем ефективності задоволення потреби. Більш доцільним є відмова від проекту

Коефіцієнт рівня відповідності (або адекватності) задуму запитам споживачів ( $Z$ ) розраховуємо за формулою:

$$Z = \frac{\sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^n X_{ij} \cdot \omega_i}{m \cdot O_{max}} \rightarrow 1, \quad (4.2)$$

де  $X_{ij}$  – оцінка  $i$ -ї характеристики задуму  $j$ -м респондентом за обраною оцінною шкалою  $[O_{min}; O_{max}]$ , де  $i \in [1;n]$ ,  $j \in [1;m]$ , од.;

$\omega_i$  – вагомість  $i$ -го показника (характеристики), відн.од.;

$n$  – кількість параметрів, що оцінюються;

$m$  – кількість усіх респондентів;

$O_{min}, O_{max}$  – відповідно значення нижньої та верхньої меж оцінної шкали, од.

Для прийняття рішень за оцінкою рівня адекватності задуму запитам споживачів можна використовувати таблицю 4.2. Оскільки досліджувана авторами в рамках НДР інновація за своєю сутністю є ординарною інновацією, розглянемо значення рівня адекватності задуму саме для ординарної інновації.

Таблиця 4.2 – Рівень адекватності задуму для ординарної інновації [58]

Рівень адекватності задуму			
Прийнятний	Припустимий	Критичний	Катастрофічний
$Z > 0,8$	$0,7 < Z \leq 0,8$	$0,5 < Z \leq 0,7$	$Z \leq 0,5$

Ймовірність здійснення покупки ( $P$ ) потенційної екологічної інновації споживачами визначається на основі даних опитування споживачів, за результатами відповідей яких формуються групи споживачів  $m_I$  ( $P_I=0$ ),  $m_{II}$  ( $0 < P_{II} \leq 0,25$ ),  $m_{III}$  ( $P_{III} > 0,25$ ),  $m = m_I + m_{II} + m_{III}$ .

Якщо значення показника  $P \geq 30\%$ , слід визначити питому вагу споживачів групи  $m_I$  та  $m_{II}$ , яких не цікавить потенційна екологічна інновація, а, отже, ймовірність здійснення ними покупки дуже низька. Якщо кількість таких споживачів не перевищує 40% усіх опитуваних, при розробленні потенційної екологічної інновації необхідно зосередити увагу на запитах споживачів групи

$m_{III}$ , які будуть складати цільовий сегмент ринку екологічної інновації з початку її комерціалізації.

Прогнозування НТП та моделювання швидкості морального старіння екологічної інновації здійснюємо за методикою, наведеною у роботі [60].

Прогнозування ЖЦЕІ, включаючи етапи інноваційного циклу та ринкового циклу, та КЦЕІ виконувалося за методикою, показаною у роботах [58, 60].

Для ординарних екологічних інновацій тривалість етапу НДДКР слід визначати методом мережного планування та моделювання (детальніше див. [58,61]. Період ринкового життя товару визначається сукупністю споживчих властивостей інновації, що обумовлюють його цінність для споживача та відповідають тим потребам, які сформується до моменту його виходу на ринок. Очікувану тривалість ринкового циклу екологічної інновації запропоновано визначати за формулою

$$T_{P.Ц} = f(b_1, y_1, y_2), \quad (4.3)$$

де  $b_1$  – показник, що враховує вид екологічної інновації;

$y_1$  – швидкість зростання обсягів продажу екологічної інновації залежно від рівня її сприйняття ринком;

$y_2$  – зміна споживчого потенціалу ринку екологічної інновації під впливом множини факторів ринкового середовища.

Прогнозування ринкового циклу інновації, на думку авторів, слід проводити за двома напрямками: визначення споживчого потенціалу та ймовірного обсягу збуту інноваційної продукції (максимально можливий обсяг інноваційного виробництва, який ринок здатний «поглинути» - загальна місткість ринку); знаходження можливого обсягу продажів інноваційного виробництва (або потенційного попиту). У роботі показана методика прогнозування ринкового циклу екоінновацій на основі поданих показників [58].

Методики оцінки еколого-економічної ефективності наведено у роботах [62-64].

Екологічними показниками оцінки доцільності реалізації проекту є оцінка програмованого врожаю, уповільнення часу розчинення поживних речовин, що дозволяє підвищити коефіцієнт використання добрив і отримати значні економічний та екологічний ефекти.

Визначення програмованого врожаю (ц/га) проводиться методом окупності [51] за формулою:

$$U_{\text{пр}} = B \cdot C_{\text{б}} + D_{\text{о}} \cdot O_{\text{о}} + D_{\text{м}} + O_{\text{м}}, \quad (4.4)$$

де  $B$  – бонітет ґрунту, бал;

$C_{\text{б}}$  – ціна 1 балу бонітету ґрунту по врожайності культури, ц/бал;

$D_{\text{о}}$  – норма органічних добрив, яку планується внести, т/га;

$O_{\text{о}}$  – нормативна окупність органічних добрив, ц/т;

$D_{\text{м}}$  – норма мінеральних добрив, яку планується внести, ц д.р./га;

$O_{\text{м}}$  – нормативна окупність мінеральних добрив (повного мінерального живлення), ц/т д.р.

Для прогнозування рівня безпеки інноваційного процесу були використані методи, досліджені Квілінським, Ткаченком та Кузіоро [65, 66]. Для прогнозування рівня економічної безпеки інновації на етапах її ринкового циклу був використаний метод, розглянутий у роботах [66, 67].

Для подальшого еколого-економічного обґрунтування інноваційного проєкту запропоновано алгоритм прийняття управлінських рішень щодо його реалізації за критеріями інтегрального ризику, рівня ризику ( $K$ ,  $K \in [0; \infty]$ ) та ефективності за етапами ЖЦЕІ та КЦЕІ (рис. 4.2).

Види ризиків інноваційної діяльності, в тому числі екологічних ризиків, та методика їх оцінки запропоновані у роботах [68,69].

Оцінку ризику екологічно орієнтованого інноваційного проєкту за етапами ЖЦЕІ та КЦЕІ запропоновано здійснювати за моделлю:



$$\begin{aligned}
R_1 &= \sum_{j=1}^9 \Delta D_{1j} p_{1j}, & R_4 &= \sum_{j=2}^{10} E_{зб.в. j} p_{4j}, & R_{\Sigma} &= \sum_{i=1}^7 R_i \rightarrow \min, \\
R_2 &= \sum_{j=5}^9 \Delta D_{2j} p_{2j}, & R_5 &= \sum_{j=2}^{10} E_{зб.сн. j} p_{5j}, & & (4.5) \\
R_3 &= \sum_{j=1}^9 \Delta I_j p_{3j}, & R_6 &= \sum_{j=2}^{10} E_{зб.сус. j} p_{6j}, & 0 \leq p_{ij} \leq 1, \sum p_j &= 1,
\end{aligned}$$

де  $R_i$  – очікуване абсолютне значення втрат від  $i$ -го виду ризику на  $j$ -му етапі при песимістичному прогнозі, грош. од., а саме за рахунок:  $R_1$  – недоотримання доходу ( $\Delta D_{1j}$ ) через затримку робіт інноваційного циклу,  $R_2$  – недоотримання доходу ( $\Delta D_{2j}$ ) через ринковий ризик,  $R_3$  – додаткового залучення більшого обсягу інвестиційних ресурсів ( $\Delta I_j$ ),  $R_4, R_5, R_6$  – екологічних збитків виробника, споживачів і суспільства відповідно, грош. од.;

$R_{\Sigma}$  – інтегральна економічна оцінка ризику реалізації проєкту, грош. од.;

$p_{ij}$  – апостеріорне значення коефіцієнта упевненості для  $i$ -го виду ризику на  $j$ -му етапі ЖЦЕІ або СКЦЕІ;

$j$  – порядковий номер етапу ЖЦЕІ та КЦЕІ,  $j \in [1;10]$ .

Попередню оцінку економічної доцільності реалізації екологічно орієнтованого інноваційно-інвестиційного проєкту з урахуванням ризику запропоновано виконувати за показником чистої поточної вартості  $NPV$  за трьома варіантами прогнозу. Для песимістичного прогнозу вона становить:

$$NPV = \sum_{t=0}^{T_{СКЦЕІ}} \frac{CF_t - I_t}{(1+r)^t} - R_{\Sigma}, \quad (4.6)$$

де  $CF_t$  – надходження грошових коштів (фінансовий потік) від реалізації екологічно орієнтованого інноваційно-інвестиційного проєкту у період  $t$ , грош. од.;

$I_t$  – обсяги інвестиційних вкладень у проєкт у період  $t$ , грош. од.;

$r$  – безризикова дисконтна ставка з урахуванням рівня інфляції, відн. од.;

$t$  – період реалізації проекту від початку ЖЦЕІ до закінчення КЦЕІ.

Для загальної оцінки ефективності реалізації екологічно орієнтованого інноваційно-інвестиційного проекту визначаємо також внутрішню норму дохідності  $IRR$ , рентабельність  $PI$  та період окупності  $PP$  за загально відомою методикою [70, 71].

Для прийняття рішень щодо реалізації проекту з прогнозуванням настання певних подій на різні етапи ЖЦЕІ, використовуються такі рекомендації, а саме:

1) На етапах інноваційного циклу (крім етапу Виведення на ринок): якщо  $E_e > 0$ ,  $K \leq 0,25$ ,  $E_e \rightarrow \max$ ,  $I \rightarrow \text{opt}$ , потрібно продовжувати реалізацію проекту; якщо не виконується хоча б одна з умов, необхідно відмовитися від реалізації проекту

2) На етапах ринкового циклу:  $E_e > 0$ ,  $E_e \rightarrow \max$ ,  $NPV \rightarrow \text{opt}$ , потрібно продовжувати реалізацію проекту; якщо не виконується хоча б одна з умов, необхідно відмовитися від реалізації проекту.

Підводячи підсумок викладеного, слід відзначити, що запропонований алгоритм ухвалення управлінського рішення на аналітично-пошуковому етапі дозволяє зменшити ризик екологічно орієнтованого інноваційно-інвестиційного бізнес-проекту та підвищити точність прогнозних розрахунків на етапі бізнес-аналізу. Запропонований методичний підхід до оцінки ефективності реалізації екологічно орієнтованого інноваційно-інвестиційного проекту з урахуванням ризику за трьома варіантами прогнозу (оптимістичним, найбільш ймовірним та песимістичним) дозволяє виконувати оцінку стійкості проекту при зміні факторів ризику, у тому числі екологічних.

#### **4.2 Попередній аналіз можливості виробництва і збуту нового продукту, оцінка комерційних перспектив іноваційного продукту**

Динаміка експортно-імпортних операцій (рис. 4.3 та рис. 4.4) свідчить про значне скорочення обсягів експорту мінеральних добрив при одночасному зростанні обсягу їх імпорту.

Аналіз обсягів імпорту та експорту у розрізі товарних позицій свідчить про значне скорочення попиту на азотні та фосфорні добрива українського виробництва на зовнішніх ринках при одночасному зростанні попиту на них на внутрішньому ринку. Попит на калійні добрива як на зовнішньому, так і на внутрішньому ринку мав негативну тенденцію. Найбільшим попитом на внутрішньому ринку користуються комплексні мінеральні добрива, імпорту яких має стійку тенденцію до зростання. При цьому обсяг експорту таких добрив за період 2011-2019 рр. скоротився на 98,5%. Зміна ринкового попиту обумовлена перш за все неціновими факторами, основним з яких є зміна запитів споживачів – на екологічно безпечні та більш економічно ефективні добрива.

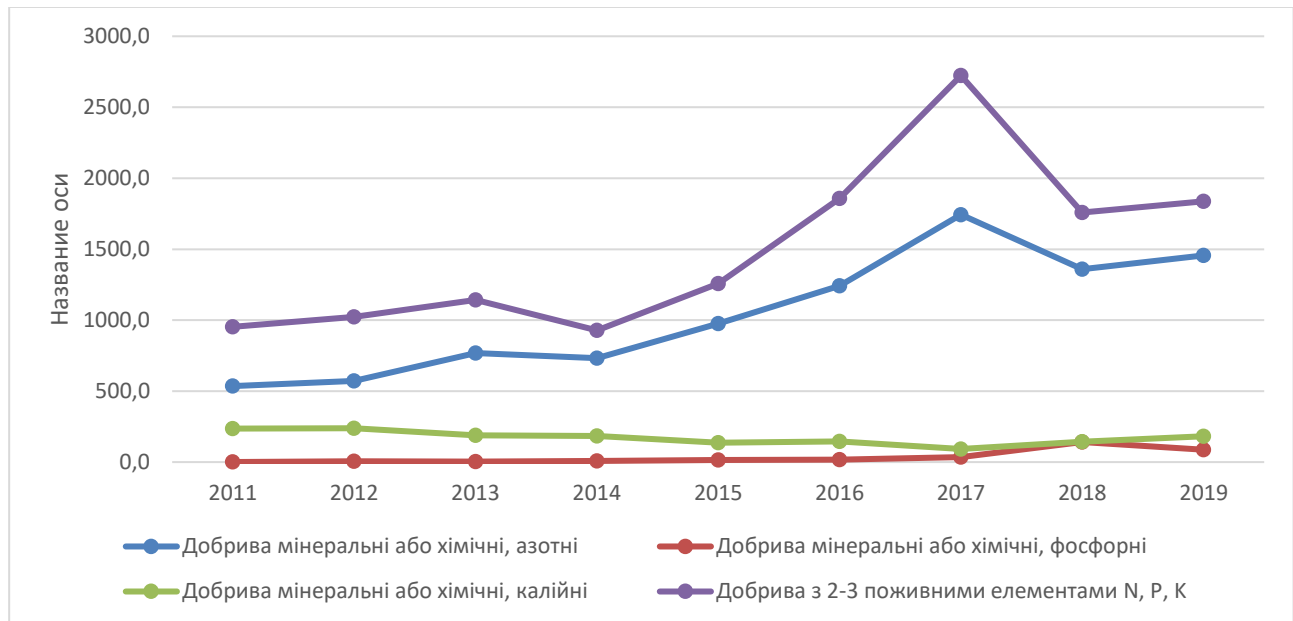


Рисунок 4.3 – Обсяги імпорту добрив з покриттям на основі фосфат-глауконітового концентрату в Україні

На основі даних [72]

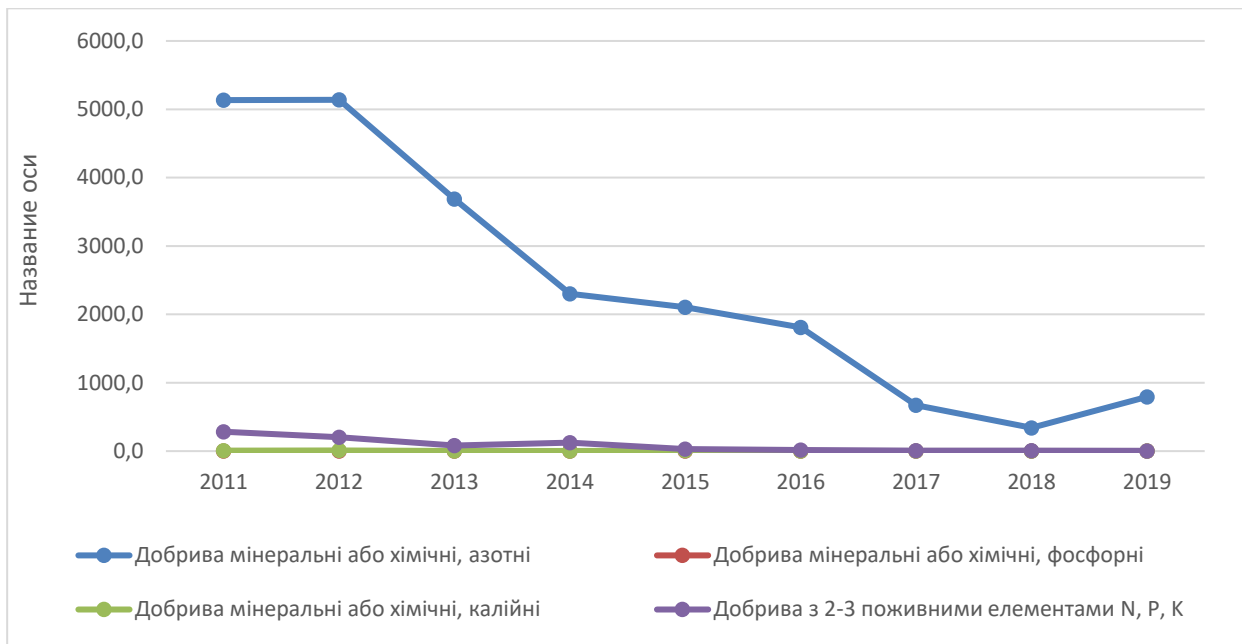


Рисунок 4.4 – Обсяги експорту добрив з покриттям на основі фосфат-глауконітового концентрату в Україні

На основі даних [72]

Суттєвою перевагою мінеральних добрив, що проплнуються у роботі, – можливість зміни їх характеристик відповідно до потреб споживачів, що досягається завдяки запропонованій авторській технології отримання складних орґано-мінеральних NPK-добрив шляхом капсулювання гранули карбаміду фосфатно-калійної оболонкою з добавками мікроелементів і гуматов. Основними завданнями такої оболонки є вивільнення азотних і фосфатних поживних речовин з гранул в ґрунт відповідно до агрохімічними потребами рослин і запобігання надходження забруднюючих речовин в ґрунт. Перевагою такої технології є можливість виробництва добрив нового покоління Industry 5.0. За рахунок зміни композиційного складу оболонки гранул досягається високій рівень кастомізації добрива при одночасному скороченні логістичних витрат, що дозволяє значно підвищити рівень їх конкурентоздатності як на внутрішньому, так і на зовнішньому ринках.

Попередня оцінка ринкових перспектив такої інновації показує високий рівень її ринкової привабливості для всіх учасників ринку: виробників, споживачів і суспільств.

Аналіз динаміки змін земельного фонду за даними Державного центру земельного кадастру показує, що понад 70% земельного фонду України охоплює сільськогосподарські угіддя [73]. Враховуючи те, що у загальній структурі земельного фонду України площа сільськогосподарських угідь становить 41,5 млн. га [73], з яких щорічно обробляється мінеральними добривами лише близько 40%, а також постійно зростаючий попит на мінеральні добрива (рис. 4.5), який порівняно з 2011 р. зріс майже вдвічі (без врахування окупованих територій), потенціал ринкової потреби у мінеральних добривах нового покоління становить 90%. Це свідчить про високу ймовірність сприйняття ринком такої інновації.

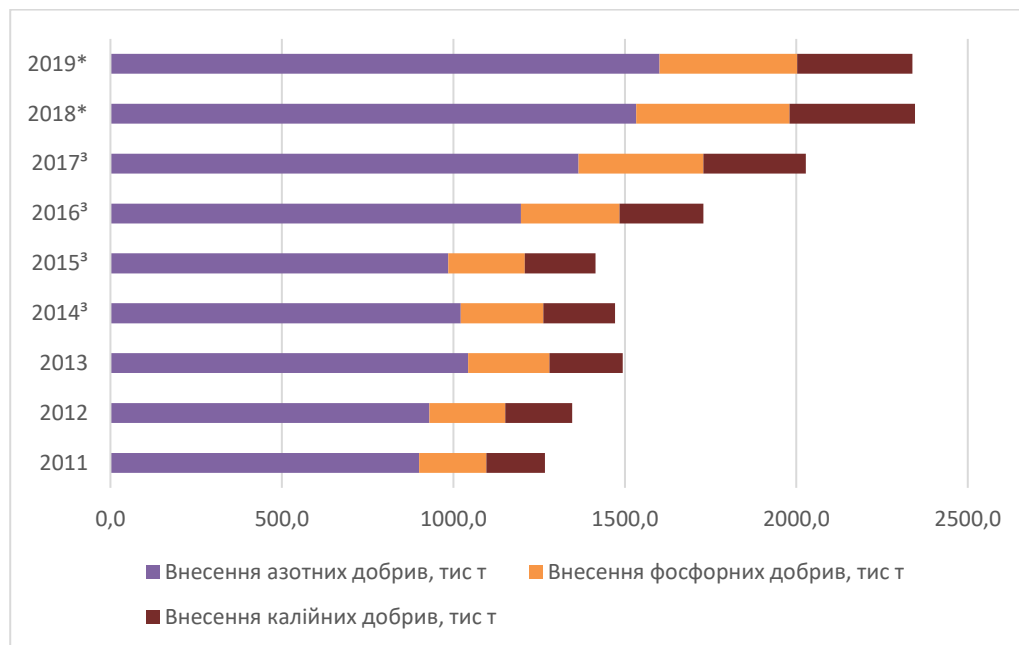


Рисунок 4.5 – Використання мінеральних добрив для врожаїв сільськогосподарських культур в Україні

\*Без урахування тимчасово окупованої території Автономної Республіки Крим, м. Севастополя та тимчасово окупованих територій у Донецькій та Луганській областях (крім площі сільськогосподарських угідь)

На основі даних [74]

Високий рівень адекватності задуму запитам споживачів ( $Z=0,98$ ) свідчить, що існують високі шанси успіху інновації на ринку. Аналіз динаміки попиту на мінеральні добрива дозволяє зробити такий висновок: враховуючи найбільш ймовірну поведінку споживачів (швидке сприйняття ринком нової

продукції) вже на етапі виведення на ринок продукція буде реалізовуватися у повному обсязі.

Згідно зіставлення даних, отриманих за допомогою математичного моделювання та експериментальних досліджень, зроблений регресійно-кореляційний аналіз дає можливість стверджувати, що між змінами втрат азоту із ґрунтової колонки при розчиненні капсульованих добрив за даними розрахунку математичної моделі та експериментальними дослідженнями спостерігається тісний кореляційний зв'язок ( $R^2=0,96-0,98$ ).

Проведені розрахунки за розробленою математичною моделлю 98 [51] показують, що використання добрив з органо-мінеральними покриттями знижує непродуктивні втрати активного інгредієнта внаслідок розчинення під час природних опадів і за рахунок повільного вивільнення азоту подовжує використання рослинами поживних речовин. Дослідженнями доведено, що можна знизити втрати азоту від застосування добрив в 1,5 – 3,5 рази. Це дозволить, відповідно, скоротити використання добрив для одержання тієї ж кількості врожаю сільськогосподарських культур при одночасному зменшенні агрогенного навантаження на повітряний басейн, ґрунт і водне середовище, техногенного навантаження при виробництві добрив, а також мінімізації перенасичення рослин азотом.

Розрахунки показують, що при збільшенні врожайності у 1,5 рази умовно відбувається зниження витрати добрив у 1,5 рази (з 60 кг/га до 40 кг/га).

Розрахований коефіцієнт екологічності для запропонованої системи добрив становить 0,517, що свідчить про екологічно безпечний рівень навантаження мінеральних добрив на ґрунт.

Запропонована технологія виробництва та застосування нового виду капсульованого добрива пролонгованої дії дозволяє одержувати добриво, яке є екологічно безпечним при його застосуванні. Крім того, повне заміщення існуючих неекологічних добрив екологічно безпечними інноваційними добривами сприятиме підвищенню рівня екологічної безпеки території, що сприятиме наближенню до досягнення його рівноважного рівня [67].

Визначення очікуваного економічного ефекту застосування мінеральних добрив із покриттям на основі фосфатів у сільському господарстві проводили з урахуванням результатів агрохімічних досліджень, які показали збільшення урожайності (зокрема, ячменю – на 30 %).

Прогнозний щорічний інтегральний еколого-економічний ефект від реалізації проектів для всіх стейкхолдерів становить близько 6 млн. дол. за рік.

За прогнозними оцінками експертів очікувана тривалість інноваційного циклу складає 18 міс.

Прогнозування тривалості ринкового циклу здійснюємо з урахуванням споживчого потенціалу ринку мінеральних добрив України.

Споживчий потенціал ринку капсульованих мінеральних добрив України складає 1,3–1,8 млн т на рік. Враховуючи виробничі можливості підприємств, показник ймовірного обсягу збуту становить 0,2 млн т на рік. Очікувана тривалість ринкового циклу становитиме 10–25 років.

Таким чином, життєвий цикл капсульованих мінеральних добрив за прогнозними розрахунками складає 11,5–26,5 років.

За нашими оцінками очікуване значення рівня ризику за всіма варіантами прогнозу знаходиться в зоні мінімального ризику, що свідчить про ефективність інноваційного проекту та доцільність його запровадження. Цей висновок підтверджують досить високі показники ефективності його реалізації, визначені на період 12 років за нормою дисконтування 6,5 % (табл. 4.3).

Розрахунок показує, що проект є високо ефективним за всіма прогнозними сценаріями розвитку подій (песимістичним, найбільш ймовірним та оптимістичним). Досить велика внутрішня норма окупності проектів свідчить про доцільність його реалізації навіть за умов залучення кредиту.

Таблиця 4.3 – Прогнозні результати проекту з виробництва та реалізації добрив з покриттям на основі фосфат-глауконітового концентрату

Показник	Оптимістичний прогноз	Найбільш ймовірний прогноз	Песимістичний прогноз
Рівень ринкової потреби у мінеральних добривах з покриттям $\varphi_i$ , %	більше 90		
Рівень адекватності задуму запитам споживачів $Z$	0,98		
Очікувана тривалість інноваційного циклу, міс	18		
Тривалість ринкового циклу, років	10–25		
Життєвий цикл мінеральних добрив з покриттям, років	11,5–26,5		
Час до інноваційного скачка $T'_{int}$ , років	10–15		
Час до морального старіння $T''_{int}$ , років	20–25		
Споживчий потенціал ринку мінеральних добрив України, млн т/рік	1,3-1,8		
Очікуваний обсягу збуту, млн. т/рік	0,2		
Інтегральні дисконтовані оцінки ризику реалізації проекту $R_{\Sigma}^{om}$ , $R_{\Sigma}^{u}$ , $R_{\Sigma}^{ec}$ , тис. дол	304	375	521,8
Коефіцієнт ризику $K$	0,005	0,012	0,059
$NPV$ , млн. дол	64,4	35,5	16,0
$IRR$ , %	71	63	51
$PI$ , %	6,2	5,8	5,4
$PP$ , років	3,3	4,1	5,4
Очікуваний щорічний інтегральний еколого-економічний ефект, млн. дол./рік	6,0		



## 5 СТВОРЕННЯ ДОСЛІДНИЦЬКОГО СТЕНДУ ДЛЯ ВИЗНАЧЕННЯ ЗАКОНОМІРНОСТЕЙ ПРОЛОНГАЦІЇ ДІЇ РОЗРОБЛЕНИХ ДОБРИВ

### 5.1 Розробка експериментальної установки для визначення закономірностей пролонгації дії розроблених добрив

Розроблене органо-мінеральне добриво пролонгованої дії на основі гранул карбаміду, що капсульоване фосфатовмісною оболонкою, потребує експериментального підтвердження часу розчинення азотної складової як основного критерія пролонгації дії добрива. З метою експрес перевірки пролонгуючої дії виготовлених добрив було запропоновано схему лабораторного дослідного стенду. Схема установки наведена на рисунку 5.1.

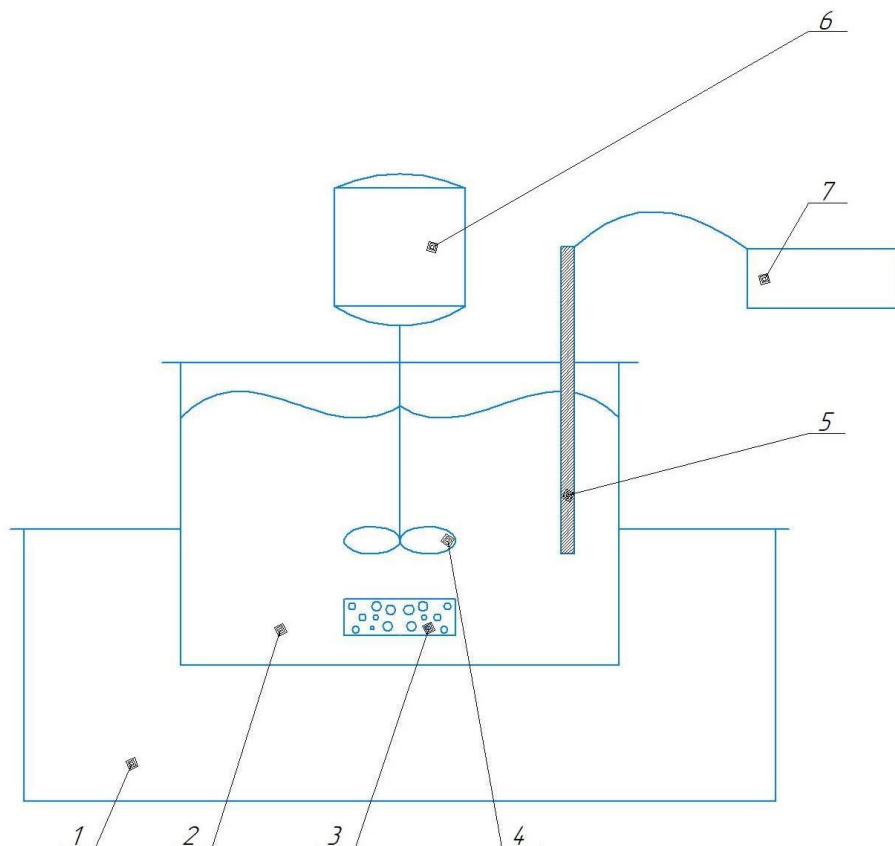


Рисунок 5.1 – Дослідницький стенд для визначення закономірностей пролонгації дії добрив: 1 – водяна баня; 2 – прозора ємність; 3 – перфорована ємність для гранул; 4 – лопатева мішалка; 5 – електрод кондуктометра; 6 – двигун; 7 – перетворювач кондуктометра

Скляну ємність 2 поміщали в водяну баню 1, де підтримується постійна температура. У скляну ємність 2, поміщається перфорована ємність 3 з наважкою капсульованих гранул. Потім включається лопатева мішалка 4. Стакан зверху закритий кришкою в якій закріплений датчик кондуктометра 5. Методика експериментального визначення терміну дії добрива полягає в наступному:

- 1) готується наважка капсульованих гранул у кількості  $(10-20) \pm 0,1$  г;
- 2) наважка гранул завантажується у перфоровану корзину;
- 3) в скляний стакан, який розміщений у термостатованій бані, заливається дистильована вода у кількості 500 мл;
- 4) включається лопатева мішалка для рівномірного перемішування всього об'єму води;
- 5) через певний час кондуктрометричним методом визначалась кількість азоту, який дифундує через фосфатовмісне покриття з ядра гранули карбаміду.

Максимальну концентрацію азоту при застосуванні вказаної методики визначали шляхом дослідження подрібненої капсульованої гранули до повного розчинення її компонентів.

Математична обробка результатів досліду з визначенням поточної кількості вивільненого азоту проводиться за наступним рівнянням:

$$x_i = \frac{C_i}{C_k} 100 \quad (5.1)$$

де  $C_i$  – поточна концентрація азотного компоненту у водяному розчині, мг/л;

$C_k$  – максимальна концентрація азотного компоненту у водяному розчині, мг/л.

Визначення міграційних процесів поживних речовин у ґрунті при застосуванні капсульованих органо-мінеральних добрив проводиться з застосуванням ґрунтових колонок, схема яких наведена на рисунку 5.2.

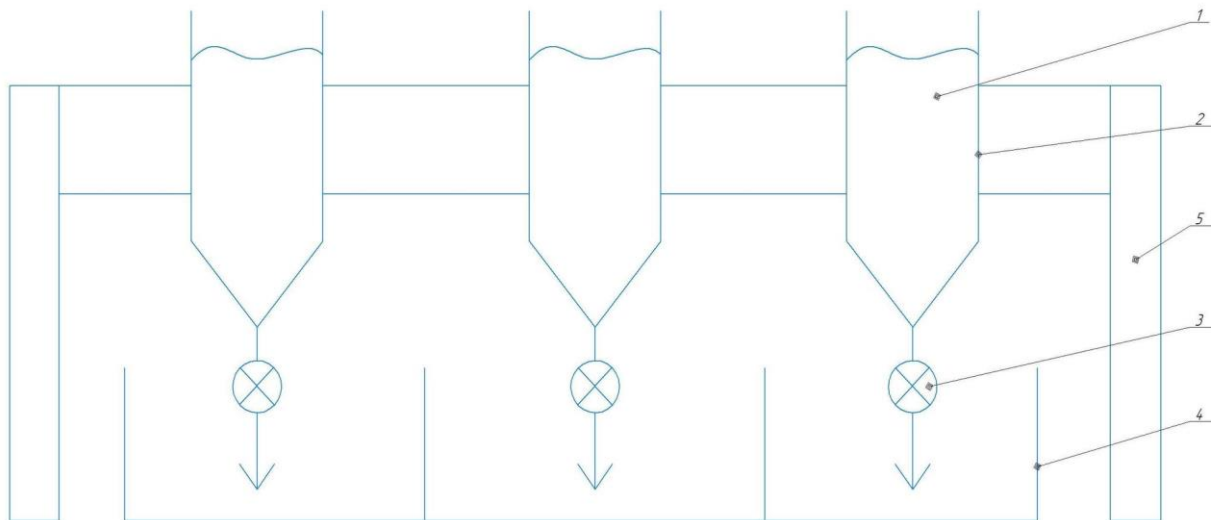


Рис. 5.2 – Схема лабораторної ґрунтової колонки:

1 – шар ґрунту; 2 – ґрунтова колонка; 3 – кран;

4 – ємність для промивних вод; 5 – штатив

Згідно з наведеною в [68] методикою, ґрунтова колонка наповнюється спеціально підготовленим шаром ґрунту, товщина якого відповідає орному шару (0–20) см. Потім проводиться попереднє зволоження ґрунту і визначається кількість води, яка насичує ґрунт. Розрахунок кількості води і періодичність зволоження розраховується у відповідності до кількості місячних опадів досліджуваного регіону. Відібраний з ґрунтових колонок розчин аналізується на вміст поживних речовин.

## 5.2 Розробка методики розрахунку тарілчастого гранулятора та програмна реалізація розрахунку

Реалізація технології нанесення порошкоподібного покриття методом агломерації на поверхні ядра гранули найбільш прийнятна для тарілчастих грануляторів [76]. При цьому, варіюючи складом пластифікатора з'являється можливість змінювати, доповнювати і модифікувати іншими хімічними елементами (мікроелементи, мікроелементи в хелатній формі, гумати лужних і лужноземельних металів) склад готового продукту. Застосування в даному випадку апаратів з активними гідродинамічними режимами (успішне

застосування таких апаратів описано в роботах [77-79] недоцільно. У поєднанні з основними перевагами тарілчастих грануляторів [80] описану технологію можна вважати досить простим і ефективним способом у порівнянні з аналогами [81, 82]. Створення методики інженерного розрахунку тарілчастого гранулятора на підставі відомих емпіричних залежностей є ненадійним, тому що враховує лише окремі етапи проектування, а не весь розрахунковий комплекс. У зв'язку з цим комп'ютерне моделювання (як це, наприклад, описано в застосуванні до гідромеханічних [83, 84], теплообмінних [85, 86], масообмінних [87-89] і реакційних процесів [90-92] є нагальною потребою для розробки інженерного методу розрахунку грануляційного обладнання. Тому в даній роботі наведена розроблена методика конструктивного розрахунку тарілчастого гранулятора, яка створена на підставі і авторських експериментальних досліджень.

#### *Вихідні дані*

$Q_{dr}$  – продуктивність тарілчастого гранулятора по сухому продукту, кг/год;

$k_1$  – вологість шихти, масові частки;

$R_{s,a}$  – витрата ретура, кг/год;

$t_{pr}$  – температура процесу, °С;

$A$  і  $B$  – константи, які залежать від виду матеріалу, що гранулюється;

$\varphi_m$  – кут природного відкосу матеріалу, що гранулюється, град;

$\alpha$  – кут нахилу тарілі, град;

$\varepsilon$  – ступінь заповнення тарілі, м<sup>3</sup>/м<sup>3</sup>;

$k_3$  – коефіцієнт уточнення робочого числа обертів тарілі;

$\gamma_{gr}$  – насипна вага гранулята, Н/м<sup>3</sup>.

#### *Алгоритм розрахунку*

Продуктивність по готовому продукту, кг/год:

$$Q = Q_{dr} \cdot (1 + k_1), \quad (5.2)$$

- кратність ретуру:

$$y = \frac{R_{s.a}}{Q}, \quad (5.3)$$

- об'єм шару шихти на тарілі гранулятора, м<sup>3</sup>:

$$V = (y + 1) \cdot Q \cdot (j + 1), \quad (5.4)$$

- де корегуючий температурний коефіцієнт:

$$j = \frac{1}{A + B \cdot t_{pr}}, \quad (5.5)$$

- діаметр тарілі, м:

$$D = \sqrt[3]{\frac{V}{0,025}}, \quad (5.6)$$

- коефіцієнт пропорційності, що залежить від ступеня заповнення тарілі матеріалом:

$$k_2 = \frac{6\pi \cdot (1 - \varepsilon)}{3\pi - 4}, \quad (5.7)$$

- висота тарілі, м:

$$H = \frac{D}{k_2} [\operatorname{tg}(\alpha - \varphi_m)], \quad (5.8)$$

- критичне число обертів тарілі гранулятор, об/с:

$$n_{cr} = \frac{42,3}{\sqrt{D}} \sqrt{\frac{\sin(\alpha - \varphi_m)}{\cos \alpha}} \quad (5.9)$$

- робоче число обертів, об/с:

$$n = k_3 n_{cr} \quad (5.10)$$

- перевірка емпіричної умови:

$$D \cdot n \leq 30 \quad (5.11)$$

- кутова швидкість тарілі, 1/с:

$$\omega = \frac{\pi \cdot n}{30} \quad (5.12)$$

- перевірка працездатності гранулятора:

$$\frac{\omega^2 \cdot D}{2g \cdot \sin \alpha} + \frac{2g}{\omega^2 \cdot D} \left( \sin \alpha - \varphi_m^2 \frac{\cos^2 \alpha}{\sin \alpha} \right) = 1,9 - 2,1 \quad (5.13)$$

- потужність приводу тарілчастого гранулятора, Вт:

$$N = 8 \cdot 10^{-6} D^2 \cdot n \cdot \sin \alpha \cdot \gamma_{gr} \quad (5.14)$$

Для реалізації алгоритму (1) - (13) розроблена програма, інтерфейс якої представлений на рисунках нижче.

Короткий опис програми виглядає наступним чином.

### **Структура програми:**

- Директорія css – файли стилів css.
- style.css – основний файл стилів програми.
- Директорія img – файли зображень.
- background.bmp – фонове зображення програми.
- granulator.jpg – схема гранулятора.
- Директорія js – файли js.
- main.js – основний сценарій виконання роботи програми.
- jquery-3.5.3.js – файл допоміжної бібліотеки JQuery.
- Файл index.html – головна сторінка програми.

### **Front-end частина:**

Файл index.html містить розмітку сторінки. Дві основні частини – блок вхідних даних виконаний використовуючи html-форми та блок результатів, що генеруються у файлі main.js.

### **Back-end частина:**

- Файл main.js містить функції для обробки вхідних даних та складається з наступних частин:
- Ініціалізація необхідних змінних.
- Функція run() – виконується після натискання кнопки RUN у формі. Поетапно викликає необхідні функції роботи програми з відстеженням помилок.
- Функція refresh() – повертає блок результатів до початкового вигляду (необхідно при повторному виконанню, при першому запуску не має ефекту).
- Функція valid() – перевіряє вхідні дані на коректність та відповідність умовам.
- Функція calc() – виконує підрахунки відповідно до умов.
- Функція result() – додає до блоку результатів строки з підрахованими даними.

- Функція `not_correct()` – допоміжна функція для виводу помилки вводу користувачу.
- Функція `deg_to_rad()` – допоміжна функція переведення значень кута з градусів у радіани.

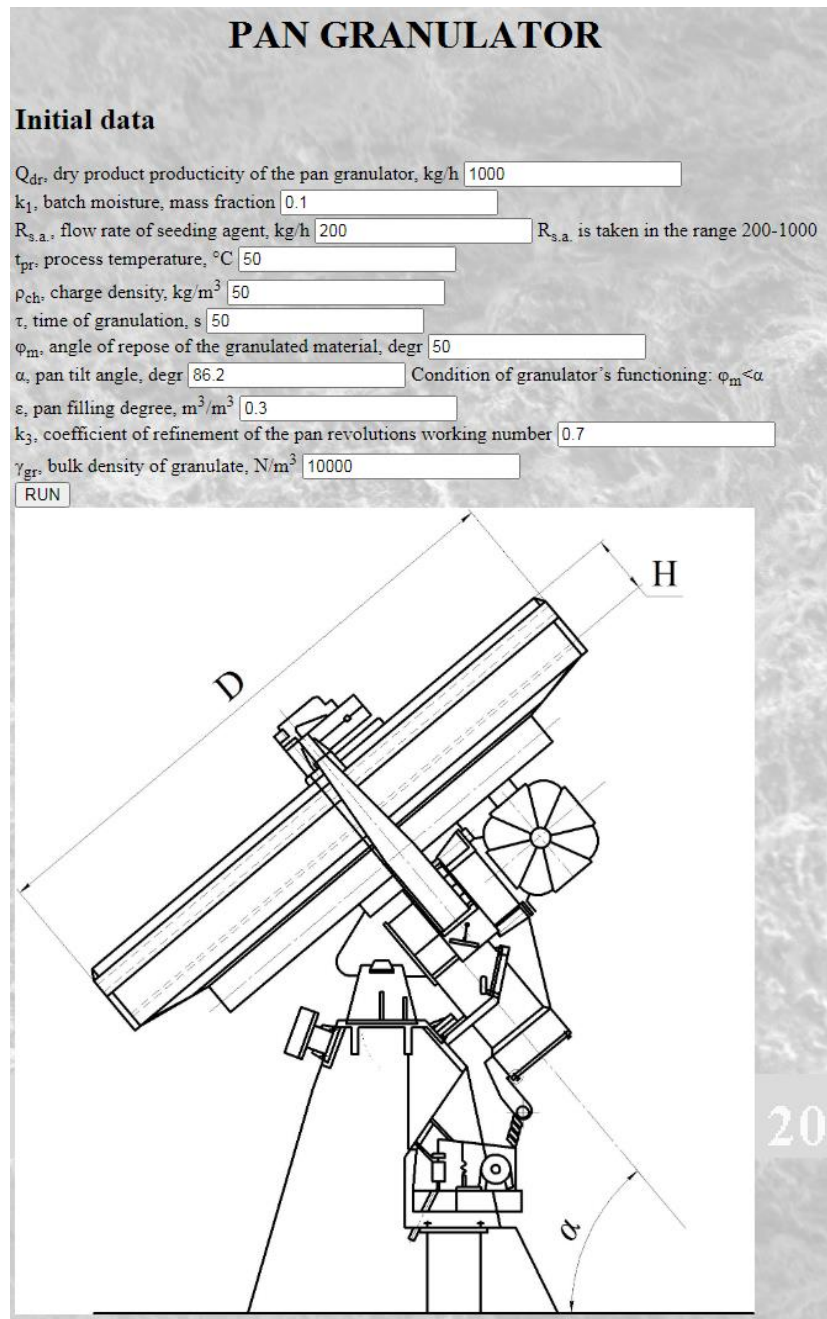


Рисунок 5.3 – Програмний продукт Pan Granulator: вихідні дані та конструкція гранулятора



## Results

Final product productivity of the pan granulator, kg/h  $Q = 0.3055555555555556$

Frequency rate of seeding agent  $\gamma = 0.18181818181818182$

Volume productivity of the pan granulator,  $m^3/s V = 0.012220299884659747$

Volume of the batch layer on the granulator's pan,  $m^3 V_{\tau} = 0.012220299884659747$

temperature correction coefficient  $j = 0.6920415224913494$

Pan diameter, m  $D = 2.9020437345295647$

Proportionality coefficient, which is depending on the degree of plate filling with the material  $k_2 = 2.432300315422637$

Panheight, m  $H = 0.8732371255618527$

Critical number of revolutions of the granulator's pan, rev/s  $n_{cr} = 74.12520894825865$

Working number of revolutions, rev/s  $n = 51.88764626378105$

Checking of empirical condition  $D \cdot n = 150.58021873929218$

Pan's angular velocity, 1/s  $\omega = 5.433661610478681$

Checking the granulator's function ability  $F = 2.0920334451949585$

$\alpha_a = 86.2\text{degr}$

Drive power of pan granulator, W  $N = 34.88237145033723$

Рисунок 5.4 – Програмний продукт Pan Granulator: результати розрахунку

## ВИСНОВКИ

Розроблена енергозберігаюча технологія капсулювання добрив безкислотним способом дозволяє реалізувати гнучку технологічну схему виробництва складних добрив. Попередні агрохімічні дослідження показали, що найбільш екологічно доцільним добривом є складне азотно-фосфорно-калійне добриво на основі гранул карбаміду, вкритих фосфатовмісною оболонкою на основі фосфат-глауконітового концентрату Ново-Амвросіївського родовища.

1. Проведені дослідження показали можливість нанесення фосфатовмісної оболонки на гранули карбаміду методом агломерації з одержанням капсульованого добрива з достатніми для їх застосування характеристиками.

2. Найбільш технологічним пластифікатором є гумат кальцію, який модифікований мікроелементним комплексом в хелатній формі.

3. Початковий розмір пор фосфатовмісної оболонки на границі ядра і оболонки складає 10 мкм.

4. Фосфатовмісна оболонка має розвинену нанопористу структуру з різною глибиною та формою пор.

5. Нанопориста структура притаманна фосфатовмісній оболонці по всій її товщині фактично до інтерфейсу гранули.

6. На поверхні та всередині оболонки присутня невелика кількість «механічних» пор, викликаних пошкодженням гранули внаслідок вивільнення вологи під час сушіння.

7. Потребує подальшого вдосконалення технологія капсулювання в частині вивчення механізмів управління процесом формування нанопористого шару.

8. Попередня оцінка інноваційного проекту з виробництва та збуту екологічної інновації – капсульованого мінерального добрива пролонгованої дії, проведена за автоською методикою оцінки екологічно орієнтованого

інноваційного проекту на аналітично-пошуковому етапі та етапі бізнес-аналізу, показала доцільність його реалізації.

9. Попередня оцінка ринкових перспектив такої інновації показує високий рівень її ринкової привабливості для всіх учасників ринку: виробників, споживачів і суспільств.

10. Показники ефективності реалізації інноваційного проекту за трьома варіантами прогнозу (оптимістичним, найбільш ймовірним та песимістичним) є високими, що також доводить доцільність його реалізації. Досить велика внутрішня норма окупності проектів свідчить про доцільність його реалізації навіть за умов залучення кредиту.

11. За показниками оцінки екологічної безпеки та соціо-еколого-ефективності інноваційний проект є екологічно безпечним, має екологічно безпечний рівень навантаження мінеральних добрив на ґрунт та має екоконструктивний вплив на довкілля.

12. Подальших досліджень потребує оцінка конкурентоспроможності інноваційних добрив на внутрішньому та зовнішньому ринках, якісний та кількісний аналіз ризику на всіх етапах ЖЦЕІ та КЦЕІ, визначення собівартості нового добрива, а також розробка комплексу маркетингу.

## СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Вакал В. С., Вакал С. В., Цапко Ю.Л. Розробка і застосування екологічно доцільних добрив. Матеріали X міжнародної науково-практичної конференції «КОМПЛЕКСНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЯКОСТІ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПРОЦЕСІВ ТА СИСТЕМ», Том 2 , 23–24 вересня 2020 р., Чернігів, С. 112.
2. Вакал С. В., Вакал В. С. Екологічні і технологічні аспекти процесу капсулювання азотних добрив. Прикладні науково-технічні дослідження: матеріали IV міжнародної науково-практичної конференції, Т. 1, 1–3 квітня 2020 р., Івано-Франківськ, С. 133.
3. Гурець Л. Л., Вакал В. С., Цапко Ю. Л., Вакал С. В. Оценка экологического эффекта при применении капсулированных азотных удобрений. Екологічна безпека. Серія: Розробка екологічно безпечних технологій, процесів і устаткування. 2018. № 1/2018 (25). С. 61–68.
4. S. Vakal, A. Yanovska, V. Vakal, A. Artyukhov, V. Shkola, J. Krmela The ecological and economic fundamentals of novel types capsulated fertilizers development. The 6th International congress sustainable development: environmental protection. Energy saving. Sustainable environmental management (EPESSEM 2020) 23-25th September 2020, Lviv, 2020. P. 145.
5. Shkola V., A. Yanovska, Vakal S., Vakal V., Artukhov A. Market perspectives on innovative capsulated fertilizers on the base of Granule Shell Technology International scientific-practical conference. “Modern agrarian management of the XXI-th century: Agriculture of future”, 24-25 september 2020, MAGM, 2020.
6. Prokopenko, O. V., Shkola, V. Yu, Domashenko, M. D., Prokopenko, M. O. (2015). Conceptual grounds to form motivational constituent of the international ecological policy. Marketing and Management of Innovations, Issue 4, 245-259. Available at: <http://mmi.fem.sumdu.edu.ua/en/journals/2015/4/245-259>
7. Brauweiler, Hans-Christian, Shkola, V., Markova O. (2017). Economic and legal mechanisms of waste management in Ukraine. Marketing and Management of Innovations, 2, 359-368. Available at: <http://mmi.fem.sumdu.edu.ua/en/journals/2017/2/359-368>.

8. Shkola V. Yu., Domashenko M. D., Kuchmiyov A. V., Novak K. S. (2016). Fundamentals of the Ukrainian land fund management. Marketing and Management of Innovations, 2, 235-345. Available at:  
[http://mmi.fem.sumdu.edu.ua/sites/default/files/mmi2016\\_2\\_235\\_245.pdf](http://mmi.fem.sumdu.edu.ua/sites/default/files/mmi2016_2_235_245.pdf)
9. Prokopenko, O.V., Shkola, V. u., Omelyanenko, V.A. (2013). Analysis of the use of international leasing in terms of improving the effectiveness of technology transfer by the example of agroindustrial complex. Marketing and Management of Innovations, Issue 3, 185-199. Available at:  
<http://mmi.fem.sumdu.edu.ua/en/journals/2013/3/185-199>.
10. Shkola V., Olshanska O., Kasyanenko T., Domashenko M. (2021). Management of enterprise's advanced development for its international competitiveness. In: Elhoseny, M., Yuan, X., Krit, S. (Eds.), Distributed Sensing and Intelligent Systems Distributed Sensing and Intelligent Systems. Proceedings of ICDSIS 2020, Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-64258-7>.
11. Кисель ВИ (2000) Биологическое земледелие в Украине: проблемы и перспективы. Харьков : Штрих, 162 с.
12. Справочник по определению норм удобрений под планируемый урожай / под ред. Ф. Е. Мосиюка, А. П. Лисовала, Н. Е. Власенко, А. Я. Гетьманца. К. : Урожай, 1989. 512 с.
13. Мудрый И. В. Эколого-гигиенические аспекты применения минеральных удобрений в сельском хозяйстве. *Гигиена и санитария*. 2006. № 4. С. 40 – 43.
14. Найштейн С. Я., Меренюк Г. В., Чергинец Г. Я. Гигиена окружающей среды и применение удобрений. Кишенёв : Штиинца, 1987. 141 с.
15. Классен П. В., Гришаев И. Г. Основные процессы технологии минеральных удобрений. М. : Химия, 1990. 304 с.
16. Научное окружение современного человека: Техника и технологии : монография. Одесса : КУПРИЕНКО СВ, 2018. С. 147–148.
17. Попович О. Р. Механізм і кінетика десорбції цільових компонентів з адсорбентів, покритих полімерними оболонками : автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук : 05.17.08. Львів, 2001. 19 с.

18. Нагурський О. А. Закономірності капсулювання речовин у стані псевдозрідження та дифузійного вивільнення : монографія. Львів : Видавництво Львівської політехніки, 2012. 188 с.
19. Одинцов А. В. Капсулирование гранул минеральных удобрений в композиционные оболочки: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.17.08 / Одинцов А. В. Иваново, 2010. 16 с.
20. Тошинський В. І., Петрівна В. С. До питання про розробку добрив пролонгованої дії. *Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я (MicroCAD–2011). Секція № 11 – Рішення поліваріантних задач у хімічній технології* : тези доп. 19-ї міжнар. наук.-практ. конф. 01–03 червня 2011 р. Х. : НТУ «ХПІ», 2011. С. 266.
21. Мінеральні добрива пролонгованої дії для оптимізації живлення сільськогосподарських культур / Городній М. М. та ін. *Рекомендації для сільськогосподарських підприємств України різних форм власності*. НУБіП України. 2010. 60 с.
22. Кувшинников И. М. Минеральные удобрения и соли. М. : Химия, 1987. 256 с.
23. Малюга Ю. Є. Екологічне обґрунтування ефективності азотмісних добрив пролонгованої дії : автореф. дис. ... д-ра с.-г. наук : 03.00.16 / Дніпропетровський держ. аграрний ун-т. Д., 2009. 42 с.
24. Мороз Т. Ю., Пролыгина О. В. Новый эффективный капсулянт для минеральных удобрений. *Технология-2004* : сборник тез. докл. научной конференции. Северодонецк, 2004. URL: <http://www.sti.tg.ua> (дата звернення: 15.05.2012).
25. Острога Р. О. Процес покриття гранул мінеральних добрив органічною суспензією: дис. ... канд. техн. наук: 05.17.08 / СумДУ. Суми, 2014. 139 с.
26. Пироговская Г. В. Медленнодействующие удобрения. Минск : Сельхознаука, 2000. 291 с.
27. Малюга Ю. Е. Эффективность применения медленнорастворимого аммофоса на эродированной почве под лесомелиоративными насаждениями. *Вісник ХНАУ імені В.В. Докучаєва*. 2005. № 1. С. 166 – 168.

28. Кравец Г. В. Формирование фосфатных покрытий на гранулах карбамида : дис. ... канд. техн. наук : 05.17.01. Ленинград, 1984. 174 с.
29. Vakal S.V., Vakal V.S., Artyukhov A.E., Shkola V.Y., Yanovska G.O. Nanoporous Organo-Mineral Fertilizers obtained by using of Granule Shell Technology. The materials of 8th International Conference on Nanotechnologies and Nanomaterials (NANO-2020) will take place from August 26 to 29, 2020, Lviv Polytechnic National University. P. 253.
30. Shkola V., Vavilichev M. Competitiveness of Ukraine in modern international economic relations. Економіка, інноватика та сучасні бізнес-технології: актуальні проблеми та розвиток: матеріали III Міжнародної науково-практичної конференції (Суми, 25 червня 2020 року). Суми: СДПУ, 2020.
31. Shkola V. Advanced development and Intellectual capital: an Influential assessment. Socio-Economic challenges: International Scientific and Practical Conference (Sumy, November 3-4, 2020). – Sumy: SSU, 2020
32. Тошинський В. І., Петрівна В. С., Печенко Т. І., Фаріга О. М. Капсулювання азотовмісних добрив модифікованими фосфатами українських родовищ. *Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я (MicroCAD–2010). Секція № 13 – Інтегровані хімічні технології у хімічній техніці та екології* : матеріали 18-ї міжнар. наук.-практ. конф. 12–14 травня 2010 р. Х. : НТУ «ХП», 2010. С. 25.
33. Kuna Aparna, Poshadri Achinna. 2018. MICROENCAPSULATION TECHNOLOGY: A REVIEW. ANGRAU, 38(1), 86–102.
34. Вакал В. С., Вакал С. В. Фосфоромісні мінеральні добрива. Вітчизняна фосфатна сировина для їх виробництва. *Хімічна промисловість України* : наук.-виробн. журн. 2013. № 1. С. 36–39.
35. Vakal S., Yanovska A., Vakal V., Artyukhov A., Shkola V., Yarova T., Dmitrikov V., Krmela J., Malovanyu M. Minimization of Soil Pollution as a Result of the Use of Encapsulated Mineral Fertilizers. Journal of Ecological Engineering Vol. 22(1), 2021 p. 221–230. <https://doi.org/10.12911/22998993/128965>.

36. Школа В.Ю., Яновська Г.О., Вакал С.В., Артюхов А.Є. Науково-методичний підхід до оцінки продовольчої безпеки держави. Свідectво про реєстрацію авторського права на твір №99705 від 15.09.2020.
37. Вакал С.В., Максименко Б.О., Зеленський А.М., Спосіб одержання гранульованого сульфату калію, одержаного з техногенної сировини / МПК, C05D 1/02 (2006/01), патентовласник СумДУ, опубл. 25.08.2020, Бюл. № 16
38. Shkola V., Domashenko M., Kasianenko T., Scherbachenko V. (2020). International economic security management within the advanced innovative development paradigm // National Development Goals: Innovation Framework. Monograph / ed. by O. Prokopenko, V. Omelyanenko/ Agenda Publishing House Limited, London, United Kindom, 2020. P. 30–48.
39. Школа В.Ю., Щербаченко В.О., Захаркіна Л.С., Пахненко О.М. Ризики зміни векторів інноваційного розвитку суб'єктів господарювання України з урахуванням нових викликів сучасного світу. Траєкторії формування національної інноваційної стратегії забезпечення економічної безпеки України : монографія / за заг. ред. канд. екон. наук, доц. Л. С. Захаркіної. – Суми : Сумський державний університет.
40. Kotenko O., Shkola V., Domashenko M., Kasianenko T., Khomutenko L. Anti-crisis management of international investments in energy efficient, resource-saving and clean technologies. *International Journal of Ecological Economics and Statistics*, 2020, Volume 41, Issue 4.  
<http://www.ceser.in/ceserp/index.php/ijeec/article/view/6627>
41. Vakal S., Yanovska A., Vakal V., Artyukhov A., Shkola V., Yarova T., Dmitrikov V., Krmela J., Malovanyu M. Minimization of Soil Pollution as a Result of the Use of Encapsulated Mineral Fertilizers. *Journal of Ecological Engineering* Vol. 22(1), 2021 p. 221–230. <https://doi.org/10.12911/22998993/128965>
42. Вакал С.В. Науково-теоретичні основи створення нових екологічно безпечних технологічних процесів виробництв фосфорвмісних добрив / автореферат дис. на здобуття наук. ступ. д.т.н., Суми, 2018, С.38.



43. Оценка глобального землепользования: баланс между потреблением и устойчивым производством : доклад ООН. Давос, Швейцария, 24.01.2014. 6 с.
44. Волощук М. Деградація ґрунтів – глобальна екологічна проблема. Вісник Львівського університету. Серія географічна. 2017. Вип. 51. С. 63–70.
45. R. L. (Bob) Nielsen. N loss mechanisms and nitrogen use efficiency. Purdue Nitrogen Management Workshops. 2006. P. 1–5.
46. Екологічний стан ґрунтів України / Балюк С. А. та ін. Український географічний журнал. Харків, 2012. 2. С. 38–42.
47. Мальований М.С., Гавриляк М.Я., Недадь Хуссейн Мусалам Аль Хасанат. Можливості екологічно безпечного використання мінеральних добрив. Екологічна безпека 3/2009 (7), С. 31–37.
48. Клименко Р.Н. Технология азотно-фосфорных серосодержащих удобрений на основе сирийского фосфорита : дис. ... канд. техн. наук : НТУ “ХПИ”. Харьков, 2010.
49. WEI Hai-yan, CHEN Zhi-feng, XING Zhi-peng, ZHOU Lei, LIU Qiu-yuan, ZHANG Zhen-zhen, JIANG Yan, HU Ya-jie, ZHU Jin-yan, CUI Pei-yuan, DAI Qi-gen, ZHANG Hong-cheng. Effects of slow or controlled release fertilizer types and fertilization modes on yield and quality of rice. Journal of Integrative Agriculture, Volume 17, Issue 10, October 2018, P. 2222-2234.
50. Trenkel, M. E. 2010. “Slow- and controlled-release and stabilized fertilizers: an option for enhancing nutrient use efficiency in agriculture.” International Fertilizer Industry Association (IFA) Paris, France, 2010.
51. Вакал В. С. Зниження техногенного навантаження на навколишнє середовище при застосуванні азотних добрив з фосфоровмісним покриттям: дис. к.т.н., спец.: 21.06.01 – екологічна безпека, СумДУ, Суми, 2019, 195 с.
52. Інтернет ресурс. Код доступу: [http://www.4exam.info/book\\_255\\_glava\\_19\\_2.10.\\_Osnovi\\_ekonom%D1%96ki\\_ra%D1%81%D1%96onalnogo\\_prirodokori\\_stuvannja.html](http://www.4exam.info/book_255_glava_19_2.10._Osnovi_ekonom%D1%96ki_ra%D1%81%D1%96onalnogo_prirodokori_stuvannja.html).
53. Руководящие указания по эффективной практике и учету факторов неопределенности в национальных кадастрах парниковых газов. *Программа*

*МГЭИК по национальным кадастрам парниковых газов. CORRIGENDUM (GPGAUMCorr.2001.01). 15 июня 2001 г.*

54. Методика расчета выбросов парниковых газов. Республика Казахстан, 5 ноября 2010 г.
55. Вольчин И. А. Киотский протокол и теплоэнергетика Украины. *ЭСКО : электронный журнал энергосервисной компании «Экологические системы»*. 2006. № 8. URL: [http://journal.esco.co.ua/2006\\_8/art101.htm](http://journal.esco.co.ua/2006_8/art101.htm) (дата звернення: 28.07.2017).
56. Будзяк О. С. Формування екологічнобезпечного землекористування на сільськогосподарських угіддях України. *Збалансоване природо-користування*, 2006, 3, 180–187.
57. Гурець Л. Л., Цапко Ю. Л., Мальований М. С., Вакал В. С. Експериментальні дослідження кінетики розчинення капсульованих азотних добрив. *Науковий вісник НЛТУ України*. 2019. Т. 29. № 2. С. 94–98.
58. Школа В.Ю. Економічні основи прогнозування життєвого циклу екологічних інновацій. – Дис... к.е.н.: 08.00.06. – Суми, 2008. – 230 с.
59. [Dyadyura](#) K., Shkola V. (2018). Scientific Principles of the Nanotechnology Management. *Nanomaterials: Application & Properties, 2018 IEEE 8th International Conference on Nanomaterials: Applications & Properties*.
60. Кучин Б.Л., Якушева Е.В. Управление развитием экономических систем: технологический прогресс, устойчивость /– М. : Экономика, 1990. – 157 с.
61. Разумов И.И., Глаголева Л.А., Ипатов М.И., Ермилов В.П. *Организация, планирование и управление предприятием машиностроения*. – М. : Машиностроение, 1982. – 544 с.
62. Мельник Л.Г., Пенс Л. (ред.) *Социально-экономический потенциал устойчивого развития*. – Сумы : ИТД «Университетская книга», 2007. – 1120 с.
63. Shkola V., Olshanska O., Kasyanenko T., Domashenko M. (2021). Management of enterprise's advanced development for its international competitiveness. In: Elhoseny, M., Yuan, X., Krit, S. (Eds.), *Distributed Sensing and Intelligent*

- Systems Distributed Sensing and Intelligent Systems. Proceedings of ICDSIS 2020, Springer, <https://doi.org/10.1007/978-3-030-64258-7>
64. Prokopenko, O.V., & Kasyanenko, T.V. (2013). Complex approach to scientific grounding at selecting the direction (variant) of eco-aimed innovative development at different levels of management. *Actual Problems of Economics*, 139(1), pp. 98-105.
65. Kwilinski, A., Tkachenko, V., & Kuzior, A. (2019). Transparent Cognitive Technologies to Ensure Sustainable Society Development. *Journal of Security and Sustainability Issues*, 9(2), 561-570 [http://doi.org/10.9770/jssi.2019.9.2\(15\)](http://doi.org/10.9770/jssi.2019.9.2(15))
66. Prokopenko, O.V., Shkola, V.Y., Domashenko, M.D., & Prokopenko M.O. (2014). The Theory and Methods for Investigation of the Processes Synchronized Dealing with Ecological Safety within Economic System. *Marketing and Management of Innovations*, 4, 182-191. Retrieved from <https://mmi.fem.sumdu.edu.ua/journals/2014/4/182-191>
67. Прокопенко О.В., Школа В.Ю. Управління еколого-економічною безпекою підприємства на засадах екомаркетингу // Менеджмент і маркетинг інновацій. 2012. № 4. С. 337-346
68. Ілляшенко С.М. Економічний ризик: [навч. посібн.] / Ілляшенко С.М. [2-ге вид., доповн. і перероб.] К. : Центр навчальної літератури, 2004. – 220 с.
69. Ілляшенко С.М. Управління екологічними ризиками інновацій: [монографія / за ред. д.е.н., проф. С.М. Ілляшенка] / Ілляшенко С.М., Божкова В.В. – Суми : ВТД „Університетська книга”, 2004. 214 с.
70. Козьменко С.Н. (Ред.), Ярошенко С.П., Васильева Т.А. [и др.] Инвестиционные решения и управление НТП: монография /; Под ред. С.Н. Козьменко. Сумы : Университет. кн., 2005. 158 с.
71. Липиц И.В., Косов В.В. Инвестиционный проект: методы подготовки и анализа. – М. : Издательство БЕК, 1996. 304 с.
72. State Fiscal Service of Ukraine. (2020a). *The total volume of imports and exports in terms of product items by codes of Ukrainian classification of goods of foreign economic activity*. Retrieved from URL <http://sfs.gov.ua/ms/f11>

73. Shkola V.Y., Domashenko [M.D.](#), Kuchmiyov A.V., Novak K.S. Fundamentals of the Ukrainian land fund management // Marketing and Management of Innovations. – 2016. – №2. – С. 235-345.
74. State Statistics Service of Ukraine.(2020b). Use of inorganic and organic fertilizers (1990-2019). Retrieved from URL [http://www.ukrstat.gov.ua/operativ/menu/menu\\_u/cg.htm](http://www.ukrstat.gov.ua/operativ/menu/menu_u/cg.htm)
75. Stahl H. Comparing Different Granulation Techniques / Pharmaceutical Technology Europe, 2004, pp.23-33.
76. Reynolds G.K., Le P.K., Nilpawar A.M. 2007. High shear granulation.
77. Artyukhov A., Artyukhova N. 2018. Utilization of dust and ammonia from exhaust gases: new solutions for dryers with different types of fluidized bed. Journal of Environmental Health Science and Engineering, 16, 193–204. <https://doi.org/10.1007/s40201-018-0307-5>.
78. Artyukhova N.O. 2020. Morphological Features of the Nanoporous Structure in the Ammonium Nitrate Granules at the Final Drying Stage in Multistage Devices. Journal of Nano- and Electronic Physics, 12 (4), 04036-1–04036-6. [https://doi.org/10.21272/jnep.12\(4\).04036](https://doi.org/10.21272/jnep.12(4).04036).
79. Artyukhova N.O., Krmela J. 2019. Nanoporous Structure of the Ammonium Nitrate Granules at the Final Drying: The Effect of the Dryer Operation Mode. Journal of Nano- and Electronic Physics, 11 (4), 04006-1–04006-4. [https://doi.org/10.21272/jnep.11\(4\).04006](https://doi.org/10.21272/jnep.11(4).04006).
80. Hoeung P., Bindar Y., Senda S.P. 2011. Development of granular urea-zeolite slow release fertilizer using inclined pan granulator. Jurnal Teknik Kimia Indonesia, 10 (2), 102-111.
81. Patel P., Telange D., Sharma N. Comparison of Different Granulation Techniques for Lactose Monohydrate / International Journal of Pharmaceutical Sciences and Drug Research, vol. 3, 2011, pp. 222-225.
82. S. Shanmugam. Granulation techniques and technologies: recent progresses / Bioimpacts. 5(1). – 2015. - pp 55–63.

83. Tahvildari, K., Tavakoli, H., Mashayekhi, A. & Golmohammadzadeh, R. (2016). Modeling and simulation of membrane separation process using computational fluid dynamics. *Arabian Journal of Chemistry*, 9(1), 72–78.
84. Wang, Q., Feng, Y., Lu, J., Yin, W., Yang, H., Witt, P.J. & Zhang, M. (2015). Numerical study of particle segregation in a coal beneficiation fluidized bed by a TFM–DEM hybrid model: Influence of coal particle size and density. *Chemical Engineering Journal*, 260, 240–257.
85. Chen, Q., Zhai, Z. & Wang, L. (2007). Computer modeling of multiscale fluid flow and heat and mass transfer in engineered spaces. *Chemical Engineering Science*, 62(13), 3580-3588.
86. Trojan, M. (2015). Computer modeling of a convective steam superheater. *Archives of thermodynamics*, 36(1), 125-137.
87. Liu, K., Gu, X.G., Ba, D.C., Li, P.Y., Du, G.Y., Yue, X.J. & Yang, N. (2012). Numerical Research on Flow Characteristics of Vortex Stage in Dry High Vacuum Pump. *Physics Procedia*, 32, 127-134.
88. Obodiak V., Artyukhova N., Artyukhov A. 2020. Calculation of the residence time of dispersed phase in sectioned devices: Theoretical basics and software implementation. In: Ivanov V. et al. (eds) *Advances in Design, Simulation and Manufacturing II. DSMIE 2019. Lecture Notes in Mechanical Engineering*. Springer, Cham. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-22365-6\\_81](https://doi.org/10.1007/978-3-030-22365-6_81).
89. Li, X. & Li, G. (2016). Modeling and Simulation of Hydrodynamic Bubble-Liquid Turbulent Flows in Bubble-Column Reactors. *Chemical Engineering & Technology*, 39(12), 2380-2388.
90. S.R. Kulkarni, L. A. Vandewalle, A. Gonzalez-Quiroga, P. Perreault, G.J. Heynderickx, K.M. Van Geem, G.B. Marin. *Computational Fluid Dynamics-Assisted Process Intensification Study for Biomass Fast Pyrolysis in a Gas–Solid Vortex Reactor / Energy Fuels*, 2018, 32 (10), pp 10169–10183.
91. W.Zhang. A numerical study of solid suspension layers in a swirl fluidized bed reactor, *International Journal of Chemical Reactor Engineering*, vol. 7, 2009, p. A15.

92. Zimmermann, S. & Taghipour, F. (2005). CFD Modeling of the Hydrodynamics and Reaction Kinetics of FCC Fluidized-Bed Reactors. *Industrial and Engineering Chemistry Research*, 44 (26), 9818–9827.