

УДК 502.174:661.152.3'1'2'3(143.5)  
УКПП  
№ державної реєстрації 0120U102003  
Інв.

Міністерство освіти і науки України  
Сумський державний університет (СумДУ)  
40007, Суми, вул. Р.-Корсакова, 2;  
тел. (0542) 33-41-08/33-40-49

ЗАТВЕРДЖУЮ  
Проректор з наукової роботи,  
д-р фіз.-мат. наук, проф.

\_\_\_\_\_ А.М. Черноус

ЗВІТ  
ПРО НАУКОВО-ДОСЛІДНУ РОБОТУ

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

**ВИЗНАЧЕННЯ КІЛЬКІСНОГО СКЛАДУ ФОСФАТОВІСНОГО  
ПОКРИТТЯ І ПЛАСТИФІКАТОРУ. РОЗРОБКА ОСНОВ ТЕХНОЛОГІЇ  
КАПСУЛЮВАННЯ АЗОТНИХ МІНЕРАЛЬНИХ ДОБРИВ НА  
ГРАНУЛЯТОРАХ ОКАТУВАННЯ З ОДЕРЖАННЯМ СКЛАДНИХ  
ДОБРИВ, ПРОВЕДЕННЯ ВИПРОБУВАНЬ  
(проміжний)**

Керівник науково-дослідної роботи  
Кандидат хімічних наук,  
доцент кафедри ТПХ

Г.О. Яновська

2021

Рукопис було завершено 24 грудня 2021 року

Результати роботи були розглянуті вченою радою СумДУ, протокол від 2021.12.23 № 7

**СПИСОК АВТОРІВ**

Керівник науково-дослідної роботи Доктор філософії (хімічні науки)	Г.О. Яновська (підрозділ 3, висновки)
Відповідальний виконавець: Старший науковий співробітник Доктор технічних наук (технічні науки)	С.В. Вакал (підрозділ 2 , висновки)
Виконавці: Доктор філософії (технічні науки)	А.Є. Артюхов (підрозділи 4,6)
Науковий співробітник Доктор філософії (технічні науки)	В.С. Вакал (підрозділи 3, 5)
Доктор філософії (економічні науки)	В.Ю. Школа (підрозділи 1,7)
Науковий співробітник	А.М. Зеленський (підрозділи 2,5)
Інженер 1 кат.	В.І. Скляр (підрозділи 2,5)
Лаборант	Н.М. Рудавіна (підрозділ 2)
Студент	Т.Ю. Ярова (підрозділ 3)

## РЕФЕРАТ

Звіт про НДР: 128 с., 27 рис., 24 табл., 115 джерел.

МІНЕРАЛЬНІ ДОБРИВА, ОРГАНО-МІНЕРАЛЬНІ ДОБРИВА ПРОЛОНГОВАНОЇ ДІЇ, ФОСФОРИТИ, ГУМАТИ, БІОЧАР, ФОСФАТОВМІСНА ОБОЛОНКА, ТАРІЛЧАСТИЙ ГРАНУЛЯТОР, ЕКОЛОГІЧНА БЕЗПЕКА, ЕКОЛОГО-ЕКОНОМІЧНИЙ ЕФЕКТ, МЕТОДИКА РОЗРАХУНКУ ТАРІЛЧАСТОГО ГРАНУЛЯТОРА

Збереження родючості ґрунтів є надзвичайно актуальним завданням для агропромислового комплексу для забезпечення його стійкості та безпеки в умовах сучасних викликів та загроз (як фактичних, так і потенційних), яке вирішується на інноваційних засадах – шляхом розвитку природозберігаючих технологій виробництва та використання мінеральних і органічних добрив. Розроблені останніми роками добрива пролонгованої дії вже дозволяють зменшити кількість внесених добрив для отримання того ж приросту урожаю сільськогосподарських культур, та не завжди є збалансованими за поживними і інертними речовинами, що знаходяться у складі гранули.

Проведено дослідження з отримання складних азотно-фосфорних добрив безкислотним способом шляхом нанесення фосфоритового борошна на прілли карбаміду із застосуванням гуматів калію, кальцію і мікроелементного комплексу «Аватар», що мають фізіологічно активні властивості стимулювати ріст і розвиток рослин. Гумінові речовини також відомі здатністю нейтралізувати дію важких металів та органічних забруднювачів у ґрунті, зменшуючи їх надходження до рослин.

Подальший розвиток досліджень зі збільшення поживної цінності розробленого добрива спрямований на внесення до складу фосфатовмісної оболонки біочару, який має вміст вуглецю 86 %, і дозволяє підвищити фотосинтез рослин за рахунок їх додаткового вуглецевого живлення. Біочар, маючи мікропористу структуру, також дозволяє акумулювати в собі мікроелементи та вологу і таким чином підвищує дифузійні і пролонгуючі

властивості капсульованого добрива. Подальший розвиток досліджень зі збільшення поживної цінності розробленого добрива спрямований на внесення до складу фосфатовмісної оболонки біочару, який має вміст вуглецю 86 %, і дозволяє підвищити фотосинтез рослин за рахунок їх додаткового вуглецевого живлення. Біочар, маючи мікропористу структуру, також дозволяє акумулювати в собі мікроелементи та вологу і таким чином підвищує дифузійні і пролонгуючі властивості капсульованого добрива. Проведено дослідження з отримання капсульованих добрив пролонгованої дії. Виконані фізико-хімічні дослідження підтвердили отримання якісної фосфатовмісної оболонки на поверхні прилли карбаміду. Методом скануючої мікроскопії з елементним мікроаналізом вивчені кількісні та якісні характеристики оболонки та інтерфейсу між зовнішнім фосфатним та внутрішнім, поверхнею прилли карбаміду) шарами. Показано, що наявність глибоких звивистих нанопор у структурі фосфатовмісного покриття дозволяє забезпечити проникнення ґрунтової вологи в гранулу та послідовне розчинення органічної частини оболонки та азотного ядра капсульованої гранули. Результати агрохімічних вегетаційних досліджень показали, що зелена маса зразків ячменю була вищою за контроль у зразку з капсульованою фосфатовмісним покриттям з гуматом кальцію і біочару більш ніж на 80 %, а також краща властивість досліджуваного зразка переносити посушливий період вегетації. Запропонований проєктний розрахунок обладнання установки з одержання капсульованих добрив. Запропонований варіант впровадження рекупераційної системи із застосуванням циклу Майсоценко.

Розроблено теоретико-методологічний підхід до управління просуванням зелених інновацій на основі концепції сталого інноваційного випередження та запропоновано оптимізаційну модель просування зелених інновацій на основі форсайтингу поведінкової реакції стейкхолдерів.

## ЗМІСТ

Вступ	7
1 Інноваційний вимір системи сталого сільськогосподарського землекористування: досвід ЄС для України	9
2 Експериментальні дослідження впливу технологічних параметрів та конструкції гранулятора при одержанні азотно-фосфатно-калійних добрив пролонгованої дії безкислотним способом	21
2.1 Розробка способу одержання стабілізованого за складом гумату калію	21
2.2 Розробка складу фосфатовмісного мікропористого покриття	22
2.3 Експериментальні дослідження процесу гранулоутворення на тарілчастому грануляторі	24
2.4 Методика інженерного розрахунку обладнання грануляційної установки	27
3 Дослідження фазового і хімічного складу та кристалічної структури складних добрив за допомогою спектрометрії і електронної мікроскопії різних типів	52
4 Комп'ютерне моделювання процесу розчинення капсульованих гранул, гідродинаміки та тепло-масообміну в окатувальних апаратах	68
4.1 Експериментальні дослідження з розчинення органо-мінеральних добрив пролонгованої дії	68
5 Проведення досліджень з оцінки агрохімічної, екологічної та економічної ефективності розроблених складних добрив пролонгованої дії	80
5.1 Визначення агрохімічної ефективності капсульованих органо-мінеральних добрив пролонгованої дії	80
5.2. Екологічне навантаження на довкілля при виробництві добрив	84

5.3	Визначення еколого-економічного ефекту запропонованих технічних рішень при застосуванні екологічно безпечних добрив	89
6	Пошук оптимального способу впровадження рекупераційної системи із застосуванням циклу Майсоценко	93
7	Теоретико-методичні засади управління просуванням гранульованих добрив пролонгованої дії на внутрішньому та зовнішньому ринках	97
7.1	Методологія управління просуванням зелених інновацій	97
7.2	Оптимізаційне моделювання просування зелених інновацій на основі форсайтингу поведінкової реакції стейкхолдерів	106
	Висновки	115
	Перелік джерел посилання	117

## ВСТУП

Продовольча безпека держави потребує одержання сталих урожаїв екологічно безпечних сільськогосподарських культур. Застосування агрохімічно обґрунтованих норм традиційних добрив дозволяє підвищити врожайність рослин на 20–30 %. [1] Водночас збільшення агрогенного навантаження на навколишнє середовище вимагає розробки і застосування екологічно безпечних добрив, до яких відносяться добрива пролонгованої дії. Найпоширенішими з них є капсульовані азотні добрива з покриттям різного складу (сірка, полімери, фосфати тощо). Повільне розчинення капсульованих добрив з вивільненням поживних речовин відповідно потреби вирощуваних культур дозволяє зменшити норми їх внесення на 20–30 % для одержання такої ж прибавки врожаю, що й за використання традиційних добрив. Проведений аналіз ринку добрив показує, що найбільш перспективним напрямом підвищення ефективності азотних гранул є їх капсулювання фосфатовмісними оболонками. З урахуванням значних втрат азоту з гранул карбаміду в ґрунті, саме він прийнятий як ядро капсульованої гранули. Відома властивість фосфатів повільніше розчинятися у порівнянні з азотними добривами зумовило прийняти їх за основу оболонки.

Водночас, зміни кліматичних умов вирощування сільськогосподарських рослин та зниження вмісту гумусу у ґрунті вимагають окремих рішень його підвищення. Однією з альтернатив компенсації нестачі органіки є застосування гуматів натрію та калію. З урахуванням виносу значних кількостей поживних речовин з урожаєм, у тому числі і кальцію, було запропоновано технічне рішення щодо отримання та застосування гумату кальцію, який є стимулятором росту сільськогосподарських культур і поліпшує родючий потенціал ґрунту.

Подальші дослідження з підвищення поживної цінності добрив пролонгованої дії були спрямовані на збільшення відсотку органічної складової. Як альтернативу торфу та сапропелю для покращення якості ґрунту, бідного на гумус і поживні речовини, використовували біочар – активоване вугілля, що є продуктом низькотемпературного піролізу відходів органічних речовин (дерева,

поживних залишків, торфу тощо). Використання біочару дозволяє затримувати поживні речовини і вологу в ґрунті завдяки пористості, збільшувати доступність Са, Mg, P и K для культур, зв'язувати CO<sub>2</sub> та NO<sub>x</sub>, що підвищує екологічну цінність запропонованого складу добрива.

Розроблений склад органо-мінерального добрива на основі фосфатовмісної сировини, гуматів калію та кальцію і біочару був реалізований в лабораторних умовах з одержанням зразків добрив. Проведені дослідження фазового і хімічного складу та кристалічної структури складних добрив за допомогою спектрометрії і електронної мікроскопії різних типів дозволили визначити якість контакту оболонки до ядра гранули та її властивості. В підтвердження мікропористої структури фосфатовмісної оболонки були проведені агрохімічні вегетаційні дослідження, які підтвердили високу ефективність запропонованої структури гранули. Результати агрохімічних вегетаційних досліджень показали, що зелена маса зразків ячменю була вищою за контроль у зразку з капсульованою фосфатовмісним покриттям з гуматом кальцію і біочару більш ніж на 80 %, а також краща властивість досліджуваного зразка переносити посушливий період вегетації. Розроблено методику проєктного розрахунку основного обладнання грануляційної установки з одержання капсульованих добрив.

Розроблена методика проєктного розрахунку основного обладнання грануляційної установки з одержання капсульованих добрив та комп'ютерна програма розрахунку основного апарата – конструктивних параметрів тарілчастого гранулятора.

Досліджений і запропонований варіант впровадження рекупераційної системи із застосуванням циклу Майсоценко.



# 1 ІННОВАЦІЙНИЙ ВИМІР СИСТЕМИ СТАЛОГО СІЛЬСЬКОГОСПОДАРСЬКОГО ЗЕМЛЕКОРИСТУВАННЯ: ДОСВІД ЄС ДЛЯ УКРАЇНИ

Зміна клімату, деградація довкілля, зменшення біорізноманіття є екзистенціальною загрозою для Європи та світу, найбільш чутливим до якої є саме аграрний сектор економіки, який формує продовольчу безпеку на глобальному та національному рівнях, і необхідність посилення якої стала особливо відчутною у період кризи COVID-19. Європейський зелений курс [2], запроваджений для подолання цих викликів, визначає стійкість продовольчої системи як основу стратегії сталого та інклюзивного зростання ЄС. При цьому особлива роль відводиться саме інноваціям у забезпеченні її сталості та безпеки. З огляду на це питання глобального переходу до конкурентної сталості системи сільськогосподарського землекористування на засадах концепції сталого інноваційного випередження та перетворення викликів на можливості є першочерговим завданням, яке потребує негайного вирішення.

Фундаментальні методологічні та прикладні аспекти забезпечення сталого розвитку на інноваційних засадах представлені в працях вітчизняних та зарубіжних науковців [3–8]. В той же час, незважаючи на достатньо глибокі та вагомні наукові здобутки, проблема формування нової парадигми сталого сільськогосподарського землекористування, заснованої на концепції сталого інноваційного випередження в умовах посилення кліматичних та екологічних викликів, залишається невирішеною.

Метою дослідження є вивчення досвіду ЄС щодо трансформації системи сталого сільськогосподарського землекористування на інноваційних засадах для забезпечення її стійкості та безпеки в умовах сучасних викликів та загроз (як фактичних, так і потенційних). Досягнення поставленої мети передбачає вирішення наступних завдань, які визначають структуру роботи: визначити місце України на земельній мапі ЄС, проаналізувати динаміку зміни структури земельного фонду України, визначити пріоритетні напрямки інноваційного

розвитку сталого землекористування, окреслити перспективи спільної аграрної політики та інноваційної політики для забезпечення трансформації ЄС та України на сучасну, ефективну та конкурентоспроможну економіку.

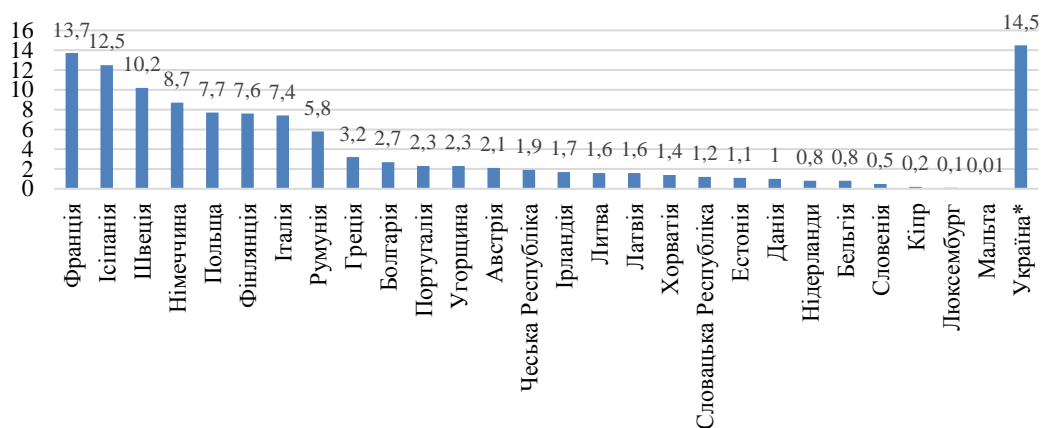
Методологічною основою дослідження є фундаментальні положення економіки природокористування та охорони навколишнього природного середовища, теорії інноватики, менеджменту та маркетингу інновацій, антикризового менеджменту, дослідження вітчизняних та закордонних авторів в галузі сталого розвитку та сталого сільськогосподарського землекористування, дані Державного комітету статистики України та міжнародних організацій (WorldBank, Eurostat, European Commission), нормативні та законодавчі акти державних органів влади, періодичні наукові видання. Для проведення дослідження було застосовано змішаний підхід, включаючи факторний аналіз та описову статистику, використовуючи вибірку з 27 економік ЄС та економіки України.

Європейська система сільського господарства та продовольства, що підтримується Спільною аграрною політикою, є глобальним стандартом продовольчої безпеки. Її трансформація на засадах сталого інноваційного випередження відповідно до Європейського зеленого курсу [2] дозволить посилити та забезпечити її стійкість у глобальному середовищі в умовах зміни клімату та втрати біорізноманіття.

Як визначено у [2], природоохоронні амбіції ЄС можуть бути досягнуті лише за умови глобального долучення всіх країн до цього процесу. Україна, курс на Європейську інтеграцію якої визначено у Конституції України, має також стати частиною цього процесу, спираючись на досвід та підтримку ЄС, який є глобальним лідером у питаннях, спрямованих на боротьбу з кліматичними та екологічними змінами, захист споживачів та демократичних цінностей.

Україна є найбільшою за площею країною ЄС (рис. 1.1). Крім того, в структурі земельного фонду (детальніше див. [9, 10]) частка сільськогосподарських угідь в Україні є найбільшою з усіх країн ЄС (табл. 1.1–1.2). Так, в структурі земельного фонду України частка сільськогосподарських

угідь становить 71,3 % (див. табл. 1.1), порівняно з найбільшими за площею сільськогосподарських угідь у структурі ЄС країнами Франції, Іспанії, Німеччини, Польщі (див. табл. 1.2), частка яких у структурі земельного фонду цих країн становить відповідно 52,3%, 52,4%, 47,6%, 47,4%, 58,3% (див. табл. 1.1). Загальна структура сільськогосподарських угідь України показана на рис. 1.2.



\*Враховано всього земель (суша), без площі води (території, що покриті поверхневими водами)

Рисунок 1.1– Площа країни до загальної площі країн ЄС, %

Таблиця 1.1 – Сільськогосподарські землі (% від земельного фонду країни\*)

(складено авторами за даними [11–13])

Країна	2000	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018
Австрія	35,6	33,7	33,4	33,1	32,9	32,9	32,9	32,4	32,2	32,1
Бельгія	45,9	44,8	44,1	44,0	44,1	44,0	43,9	44,6	43,8	44,7
Болгарія	50,5	46,5	46,9	47,2	46,0	45,8	46,2	46,3	46,3	46,3
Хорватія	20,9	23,8	23,7	23,8	28,0	26,7	27,2	27,3	26,5	26,2
Кіпр	15,3	12,4	12,6	12,7	11,8	11,8	13,7	11,8	13,1	14,2
Чеська Республіка	55,4	54,8	54,8	54,7	45,6	45,5	45,3	45,2	45,6	45,6
Данія	62,4	61,9	63,4	65,6	65,7	66,3	65,8	65,6	65,8	65,8
Естонія	23,3	22,4	22,3	22,6	22,2	22,4	22,8	23,1	23,1	23,1
Фінляндія	7,3	7,5	7,5	7,5	7,4	7,5	7,5	7,5	7,5	7,5
Франція	54,4	52,8	52,7	52,7	52,5	52,5	52,5	52,4	52,4	52,3
Німеччина	48,9	47,9	48,0	47,8	47,9	47,9	48,0	47,7	47,8	47,6
Греція	66,2	58,1	57,4	56,5	55,5	48,1	48,1	47,6	47,3	47,4
Угорщина	65,3	59,0	59,0	59,0	58,1	57,7	57,7	57,9	58,1	58,0
Ірландія	64,0	66,3	66,1	65,8	65,0	64,8	64,3	64,8	65,2	65,6
Італія	53,2	48,7	47,1	46,7	46,3	44,7	44,0	43,6	43,6	41,7
Латвія	25,5	29,0	29,2	29,6	30,2	30,1	30,3	31,1	31,1	31,2
Литва	54,5	44,2	44,8	45,3	46,1	47,1	48,0	47,2	46,9	47,1

## Продовження табл. 1.1

Країна	2000	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018
Люксембург	52,7	53,9	54,0	54,1	53,9	53,9	54,0	53,8	54,0	54,1
Мальта	28,1	32,3	32,3	32,2	32,0	32,0	32,0	32,4	32,4	32,4
Нідерланди	57,9	55,5	55,1	54,6	54,8	54,6	54,8	53,9	54,0	54,1
Польща	60,1	47,2	48,3	47,4	47,1	47,1	46,9	46,9	47,2	47,4
Португалія	43,2	39,9	39,8	40,0	40,4	40,0	39,7	39,5	39,2	39,0
Румунія	64,7	61,5	60,7	59,7	60,4	60,1	60,2	58,8	58,1	58,3
Словацька Республіка	50,7	40,4	40,1	40,1	39,4	39,3	39,3	39,2	39,1	39,3
Словенія	25,7	31,0	30,8	30,4	30,3	30,5	30,6	30,7	30,5	30,4
Іспанія	59,7	55,1	54,0	53,9	53,4	53,1	53,2	52,6	52,6	52,4
Швеція	7,7	7,5	7,5	7,5	7,5	7,4	7,5	7,4	7,4	7,4
Україна	71,5	71,2	71,3	71,3	71,7	71,7	71,7	71,7	71,6	71,3

\*Враховано всього земель (суша), без площі води (території, що покриті поверхневими водами)

Аналіз динаміки зміни площ, зайнятих під сільським господарством, у загальній структурі земельного фонду країн ЄС та в Україні, як це показано у табл. 1.1, свідчить, що даний процес має багатовекторну спрямованість, що безпосередньо пов'язано зі зміною цільового призначення земельних угідь. Так, в Україні за період 2000-2019 рр. на 60,4 % зменшилася площа перелогів, на 8,5 % – площа багаторічних насаджень, на 4,9 % та 4,4 % – площі пасовищ та сіножать відповідно. В той же час площа, що була відведена під рілля, зросла на 0,6 %. Загалом, площа сільськогосподарських угідь в Україні за досліджуваний період зменшилася на 1,2 % (або на 516,1 тис. га).

Таблиця 1.2 – Частка сільськогосподарських земель країн у структурі сільськогосподарських земель ЄС (складено авторами за даними [11–13])

Країна	2000	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018
Франція	16,3	17,0	17,1	17,1	17,2	17,4	17,4	17,5	17,5	17,5
Іспанія	16,3	16,2	16,0	16,0	16,0	16,1	16,1	16,0	16,0	16,0
Німеччина	9,3	9,8	9,9	9,9	10,0	10,1	10,1	10,1	10,2	10,2
Польща	10,1	8,5	8,7	8,6	8,6	8,7	8,7	8,7	8,8	8,9
Румунія	8,1	8,3	8,3	8,2	8,3	8,4	8,4	8,2	8,1	8,2
Італія	8,6	8,4	8,2	8,2	8,2	8,0	7,8	7,8	7,8	7,6
Греція	4,7	4,4	4,4	4,3	4,3	3,7	3,8	3,7	3,7	3,7
Угорщина	3,2	3,1	3,2	3,2	3,1	3,2	3,2	3,2	3,2	3,2
Болгарія	3,1	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0	3,1	3,1	3,1
Ірландія	2,4	2,7	2,7	2,7	2,7	2,7	2,7	2,7	2,7	2,8
Португалія	2,2	2,1	2,2	2,2	2,2	2,2	2,2	2,2	2,2	2,2
Чеська Республіка	2,3	2,5	2,5	2,5	2,1	2,1	2,1	2,1	2,1	2,2

## Продовження табл. 1.2

Країна	2000	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018
Швеція	1,7	1,8	1,8	1,8	1,8	1,8	1,8	1,8	1,8	1,8
Литва	1,9	1,6	1,7	1,7	1,7	1,8	1,8	1,8	1,8	1,8
Австрія	1,6	1,6	1,6	1,6	1,6	1,6	1,6	1,6	1,6	1,6
Данія	1,4	1,5	1,6	1,6	1,6	1,6	1,6	1,6	1,6	1,6
Фінляндія	1,2	1,3	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4
Латвія	0,9	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1	1,2	1,2	1,2
Словацька Республіка	1,3	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1	1,2
Нідерланди	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1
Хорватія	0,6	0,8	0,8	0,8	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9
Бельгія	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8
Естонія	0,5	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6
Словенія	0,3	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4
Люксембург	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
Кіпр	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
Мальта	0,00	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
<b>Разом по країнах ЄС</b>	<b>100,0</b>	<b>100,0</b>	<b>100,0</b>	<b>100,0</b>	<b>100,0</b>	<b>100,0</b>	<b>100,0</b>	<b>100,0</b>	<b>100,0</b>	<b>100,0</b>
Україна	22,6	24,3	24,4	24,5	24,8	25,1	25,1	25,3	25,3	25,2

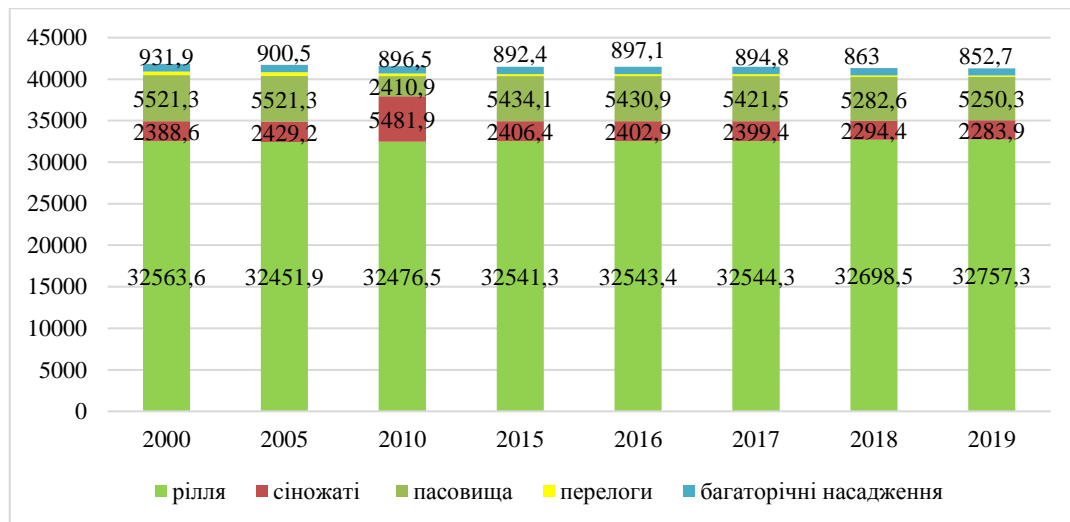


Рисунок 1.2 – Площа сільськогосподарських угідь в Україні\* [16]

\*За даними Державної служби України з питань геодезії, картографії та кадастру на кінець року (тис. га)

В той ж час, відповідно до глави 5 Земельного кодексу України від 25.10.2001 №2768-III визначено принцип пріоритетності сільськогосподарського землекористування. Зокрема, у ст. 23 зазначено, що «землі, придатні для потреб сільського господарства, повинні надаватися насамперед для сільськогосподарського використання» [14]. При цьому Законом України «Про

землеустрій» від 22.05.2003 №858-IV гарантується їх стале використання у довгостроковій перспективі «без зміни цільового призначення, погіршення якісних характеристик», що дозволяє забезпечувати «оптимальні параметри екологічних і соціально-економічних функцій територій» [15].

Для забезпечення сталості та стійкості системи сільськогосподарського землекористування, а відповідно й продовольчої системи в цілому Європейським зеленим курсом визначено необхідність проведення інтенсифікації досліджень та запровадження інновацій, спрямованих на такі цілі [2]:

- 1) захист та відновлення природних екосистеми;
- 2) збереження та поліпшення природного капіталу та здоров'я населення;
- 3) стале використання ресурсів, в тому числі земельних, енергетичних (зокрема, у енергоємних галузях – металургія, хімічна промисловість та цемент, – які є ключовими складовими у системі створення вартості). Okремо слід зазначити, що декарбонізація та модернізація цих секторів також є надзвичайно важливими.
- 4) формування здорової та екологічної продовольчої системи;
- 5) прискорення досягнення нульових забруднень,
- 6) розвиток сталої та розумної мобільності.

Крім того, для забезпечення досягнення сталого сільськогосподарського землекористування Європейською комісією визначено, що пріоритетним є:

- 1) план дій щодо органічного землекористування;
- 2) стале використання пестицидів;
- 3) реформа спільної аграрної політики та Європейський зелений курс;
- 4) добробут сільськогосподарських тварин;
- 5) маркування харчових продуктів;
- 6) стратегічні плани спільної аграрної політики.

У прийнятому Європейською комісією документі [17] визначено, що «органічне землекористування є основою сталого сільського господарства майбутнього», забезпечуючи екологізацію сільського господарства шляхом впровадження та поширення зелених інноваційних технологій виробництва,

принципу циркуляційності та добробуту тварин. Крім того, цим документом визначено досягнення амбіційних цілей зростання частки органічного сільського землекористування до 25 % у період до 2030 р. Аналіз показників країн ЄС свідчить, що даний показник фактично досягнуто Австрією, а також наближаються Естонія, Швеція, Італія, Чеська Республіка, Латвія. Швидкими темпами також розвиваються Фінляндія та Данія (табл. 1.3).

Таблиця 1.3 – Частка площ органічного землекористування, % (побудовано авторами за даними [16, 18])

Країна	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019
Австрія	19	19	19	20	21	23	24	25
Естонія	15	16	16	16	18	20	21	22
Швеція	16	16	17	17	18	19	20	20
Італія	9	10	11	12	14	15	16	16
Чеська Республіка	11	13	13	14	14	14	15	15
Латвія	11	10	11	12	13	14	14	15
Фінляндія	9	9	9	10	10	11	13	13
Данія	7	6	6	6	8	9	10	11
Словаччина	9	8	10	10	10	10	10	10
Іспанія	7	6	6	7	8	8	9	9
Греція	6	5	6	7	6	7	8	9
Литва	6	6	6	7	8	8	8	8
Португалія	5	5	6	7	7	7	6	8
Словенія	6	6	7	7	7	8	8	8
Франція	4	4	4	5	5	6	7	8
Німеччина	6	6	6	6	7	7	7	8
Хорватія	2	3	3	5	6	6	7	7
Бельгія	4	5	5	5	6	6	7	7
Угорщина	2	2	2	2	4	4	4	6
Кіпр	3	4	4	4	5	5	5	5
Люксембург	3	3	3	3	3	4	4	4
Нідерланди	3	3	3	3	3	3	4	4
Польща	5	5	5	4	4	3	3	3
Румунія	2	2	2	2	2	2	2	3
Болгарія	1	1	1	2	3	3	3	2
Ірландія	1	1	1	2	2	2	2	2
Мальта	0	0	0	0	0	0	0	1
<b>ЄС-27</b>	<b>6</b>	<b>6</b>	<b>6</b>	<b>6</b>	<b>7</b>	<b>7</b>	<b>8</b>	<b>8</b>
Україна	x	x	x	2,5	2,6	2,7	4,4	4,3

x – дані відсутні

Частка площ органічного землекористування у загальній площі сільськогосподарських угідь, що використовується, у країнах ЄС та в Україні у 2019 р. показана на рис. 1.3. Слід зазначити, що частка органічного землекористування в Україні у 2020 р. зросла на 25,6 % і становить 5,4 % загальної площі сільськогосподарських угідь [16].

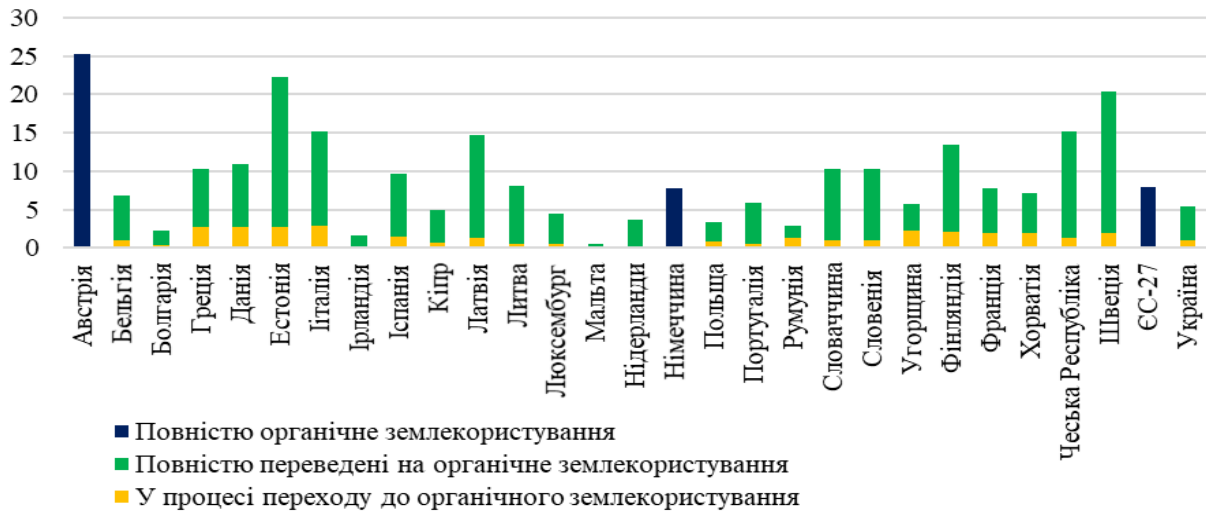


Рисунок 1.3 – Частка органічного землекористування у структурі сільськогосподарських угідь (побудовано авторами за даними [16, 18])

Динаміка зростання частки органічного аграрного землекористування у країнах ЄС та в Україні за період 2012–2019 рр. показано у табл. 3. Слід зазначити, що у таблиці сукупно враховано площі, які повністю переведені на органічне землекористування, а також ті, що перебували у процесі переходу до органічного землекористування.

Крім того, перехід до органічного сільського господарства, яке також має на меті зменшення антропогенного навантаження на довкілля, наслідком якого є зменшення біорізноманіття та деградація екосистем, передбачає скорочення використання мінеральних добрив на 20% у період до 2030 р. [19] за рахунок зменшення втрат поживних речовин щонайменше на 50%, забезпечуючи при цьому відсутність погіршення родючості ґрунту.



У зв'язку з цим важливим є відмова від використання традиційних мінеральних добрив та заміна їх більш екологічно нейтральними, які на всіх етапах еколого-економічного циклу (детальніше див. [20, 21]) не спричиняють екодеструктивного впливу на довкілля. Окремі розробки щодо запровадження капсульованих орґано-мінеральних добрив пролонгованої дії, що за своєю сутністю є ординарною зеленою інновацією, викладені у роботах [22–25]. Їх використання дозволить досягти стійкого управління поживними речовинами та кращому використанню азоту та фосфору.

Аналіз показників використання добрив для цілей сільськогосподарського землекористування в Україні (табл. 1.4) свідчить, що за період з 2005 по 2020 рр. вдвічі збільшилася площа, що обробляється мінеральними добривами, та навантаження поживними речовинами на ґрунт та рослини, в той час як темпи зростання орґанічного землекористування залишалися повільними при одночасному скороченні навантаження поживними речовинами на ґрунт та рослин майже вдвічі. Це обумовлює необхідність дослідження цього питання та запровадження відповідних заходів на державному та регіональному рівнях.

Окремо слід відзначити, що Європейською комісією визначено необхідність впровадження та забезпечення в повному обсязі відповідного екологічного та кліматичного законодавства, визначення обсягів скорочення навантаження поживними речовинами на ґрунт та рослини, а також розроблення комплексного плану дій з управління поживними речовинами для вирішення проблем забруднення поживними речовинами у джерела та підвищення стійкості сектору тваринництва.

Також ще однією інновацією має стати запровадження та розширення застосування точних методів підживлення та стійких сільськогосподарських практик, зокрема, у зонах інтенсивного скотарства та переробки орґанічних відходів у відновлювані добрива. При цьому варто відмітити, що існують ряд розробок [26], які доводять певну неефективність використання орґанічних добрив з огляду на зменшення глобальних екологічних ризиків.

Таблиця 1.4 – Внесення добрив у підприємствах в Україні<sup>1, 2</sup> [16, 27, 28]

	2000	2005	2010	2015	2016	2017	2018	2019	2020
<b>Мінеральні добрива</b>									
Удобрена площа <sup>3</sup> , тис.га	4632,1	7755,6	12614,2	14454,7	15637,9	16472,3	16079,3	16370,1	16378,0
Частка удобреної площі, %	22	45	70	81	87	89	91	91	92,7
Унесено на 1 га, кг									
удобреної площі	60	72	84	98	110	123	134	131	152
посівної площі	13	32	58	79	96	110	121	119	141
<b>Органічні добрива</b>									
Удобрена площа <sup>3</sup> , тис.га	714,5	465,2	405,5	441,8	476,3	503,6	779,1	772,5	960,6
Частка удобреної площі, %	3,3	2,7	2,2	2,5	2,6	2,7	4,4	4,3	5,4
Унесено на 1 га, т									
удобреної площі	39,8	28,5	24,4	21,8	19,2	18,3	13,7	13,4	10,6
посівної площі	1,3	0,8	0,5	0,5	0,5	0,5	0,6	0,6	0,6

<sup>1</sup> Дані наведено по підприємствах, які мають у власності та/або користуванні 200 га сільськогосподарських угідь і більше та/або більше 5 га посівних площ під овочами відкритого та/або закритого ґрунту, баштанними культурами та/або більше 50 га багаторічних насаджень.

<sup>2</sup> Дані наведено без урахування тимчасово окупованої території Автономної Республіки Крим, м. Севастополя та частини тимчасово окупованих територій у Донецькій та Луганській областях.

<sup>3</sup> під культури сільськогосподарські, без площ під культури багаторічні, сіножатей та пасовищ культивованих

Додатково потребують розроблення та запровадження інноваційні інструменти сталого землекористування, спрямовані на управління поживними речовинами та засновані на застосування технологій супутникового моніторингу, космічних технології ЄС та цифрових технологій.

Для зменшення екологічних ризиків та загроз, пов'язаних з пестицидами, Європейською комісією запропоновано запровадження комплексу інноваційних заходів забезпечення сталого їх використання. При цьому стратегічною метою на період до 2030 р. передбачено скорочення загального використання та ризику хімічних пестицидів на 50 %, а також використання більш небезпечних пестицидів на 50 % [19].

Як видно з табл. 1.5, в Україні пестицидами обробляється більше 90% всіх сільськогосподарських угідь. Скорочення їх застосування має відбуватися на інноваційних засадах для збереження рентабельності фермерських господарств, які також постраждали в період кризи COVID-19, а також є надзвичайно вразливими до ризиків, пов'язаних з кліматичними змінами.

Таблиця 1.5 – Застосування пестицидів у підприємствах за регіонами під урожай 2018-2020 років<sup>1,2</sup> [16, 27, 28]

Роки	Унесено пестицидів, т <sup>3</sup>	Оброблена площа, тис.га	Частка обробленої площі, %	Унесено пестицидів на 1 га, кг	
				обробленої площі	посівної площі
2018	25341,0	15952,4	89,4	1,6	1,4
2019	24324,6	16135,5	89,5	1,5	1,3
2020	24621,7	16185,5	91,3	1,5	1,4

<sup>1</sup> Дані наведено по підприємствах, які мають у власності та/або користуванні 200 гектарів сільськогосподарських угідь і більше та/або більше 5 гектарів посівних площ під овочами відкритого та/або закритого ґрунту, баштанними культурами та/або більше 50 гектарів багаторічних насаджень.

<sup>2</sup> Дані наведено без урахування тимчасово окупованої території Автономної Республіки Крим, м. Севастополя та частини тимчасово окупованих територій у Донецькій та Луганській областях.

<sup>3</sup> в т.ч. фунгіциди та бактерициди, гербіциди, інсектициди та акарициди, регулятори росту рослин, інші засоби захисту рослин

Першочерговим кроком, як це зазначено Європейською Комісією, є впровадження інновацій нормативно-правового характеру. Перегляд та посилення правової бази (директиви про стале використання пестицидів, положення про інтегровану боротьбу зі шкідниками, положення щодо статистики пестицидів) сприятиме більш широкому використанню безпечних альтернативних способів захисту врожаю від шкідників та хвороб. Крім того, необхідним кроком є запровадження дієвої мотиваційної системи використання альтернативних методів боротьби, яка має поєднувати інструменти як позитивної, так і негативної мотивації. В цьому контексті Європейська комісія вважає за необхідним посилення обліку пестицидів та оцінки їх екологічного ризику [19].

При запровадженні альтернативних сільськогосподарських практик, таких як сівозміна та механічне прополювання, спрямованих на зменшення використання хімічних пестицидів та залежності від них, а також їх заміщення на такі, що містять біологічно активні речовини, перевагу слід надавати тим, які є технічними системами нового покоління та відповідають цілям сталого розвитку та досягнення кліматичної нейтральності.

Зміни, які стосуються спільної аграрної політики, мають бути спрямовані на підтримку сталого розвитку сільських територій, зокрема шляхом надання фінансування через еко-схеми, а також технічної допомоги та обміну кращими практиками та інноваціями в галузі сталого аграрного землекористування.

Підсумовуючи вищевикладене, варто зазначити, що формування системи сталого сільськогосподарського землекористування потребує, по-перше, формування нової системи знань на основі новітніх досліджень та розробок, запровадження яких дозволить діяти на випередження для подолання існуючих ризиків та загроз у галузі сільського господарства та сталого розвитку сільських територій, а по-друге, розвитку системи його інституційного забезпечення, яка розкривається через дію відповідного організаційно-економічного механізму. З огляду на це, у майбутніх дослідженнях вважається за доцільним перейти до розроблення інноваційної моделі розвитку національної системи сталого землекористування з урахуванням інституційного потенціалу системи управління землекористуванням.

## **2 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ ТА КОНСТРУКЦІЇ ГРАНУЛЯТОРА ПРИ ОДЕРЖАННІ АЗОТНО-ФОСФАТНО-КАЛІЙНИХ ДОБРІВ ПРОЛОНГОВАНОЇ ДІЇ БЕЗКИСЛОТНИМ СПОСОБОМ**

Проведений аналіз ринку добрив показує, що найбільш перспективним напрямом підвищення ефективності азотних гранул є їх капсулювання фосфатовмісними оболонками. З урахуванням найвищих втрат азоту з гранул карбаміду в ґрунті, саме він прийнятий як ядро капсульованої гранули. Відома властивість фосфатів повільніше розчинятися в порівнянні з азотними добривами зумовило прийняття їх за основу оболонки.

Водночас, зміни кліматичних умов вирощування сільськогосподарських рослин та зниження вмісту гумусу в ґрунті вимагають окремих рішень його підвищення. Однією з альтернатив компенсації нестачі органіки є застосування гуматів натрію та калію, а також биочару. З урахуванням виносу значних кількостей поживних речовин з урожаєм, у тому числі і кальцію, було розроблено технічне рішення щодо отримання та застосування гумату кальцію як пластифікатору.

### **2.1 Розробка способу одержання стабілізованого за складом гумату калію**

Застосування для одержання рідкого гумату калію такої викопної сировини як торф потребує постійного корегування складу готового продукту через нестабільний склад торфу. Водночас створення високоефективного рідкого добрива з доступної сировини і постійним вмістом гумінових кислот в агрохімічно виваженому співвідношенні, яке б ефективно діяло на підвищення врожайності сільськогосподарських культур на усіх видах ґрунтів потребує внесення відповідних добавок до складу рідкого гумату калію. Поставлене завдання було вирішено шляхом дозованого приготування внесення суміші

торфу і леонардиту з подальшою реалізацією технології в регламентному режимі. В якості гуматовмісної сировини використовували суміш торфу та леонардиту у співвідношенні від 3,7 до 6,5.

Технологічний режим полягає в підготовці гуматовмісної сировини на віброситі з розміром чарунок 10 мм просіюють торф, а леонардит на ситах з розміром чарунок 3 мм. Одночасно у гомогенізатор подається вода і луг (KOH). Потім у гомогенізатор завантажують суміш гуматовмісної сировини у співвідношенні торф : леонардит 3,7÷6,5. Час обробки до гомогенної рідини 7 хв. Розчин зливають на фільтр з розміром чарунок 0,1 мм. Відфільтрований розчин має рН =10,3, масову частку вологи не більше 83,0 % і масову частку гумінових речовин 19–20 % у перерахунку на суху речовину.

Використання запропонованого технічного рішення одержання рідкого гумату калію дозволяє отримати продукт, який має масову частку гумінових речовин не менше 18 % у перерахунку на суху речовину та рН більше 10, що дозволяє підвищити коефіцієнт засвоюваності азотної, фосфатної та калійної складової добрива та покращити якість рослинної продукції [29]. Крім того, при застосуванні рідкого гумату калію підвищується родючість ґрунту.

## **2.2 Розробка складу фосфатовмісного мікропористого покриття**

У зв'язку зі зміною кліматичних умов господарювання та значним агрогенним забрудненням довкілля постає актуальним завданням розробка добрив з низьким вуглецевим слідом отримати складне добриво з підвищеним коефіцієнтом використання поживних речовин, яке буде більш екологічно безпечнішим. Такий вид добрив передбачає також часткову компенсацію дефіциту органіки та вологи у ґрунті і дозволяє зберегти родючість ріллі. Так, за результатами попередніх досліджень була розроблена рецептура капсульованого органо-мінерального добрива з введенням до складу фосфатовмісної оболонки біочару. Апробація технології одержання такого виду добрива безкислотним методом шляхом агломерації порошкоподібних компонентів на гранулі

стандартної сечовини дозволила отримати капсульоване органо-мінеральне добриво пролонгованої дії. Спосіб агломерації окатуванням характеризується незначним вмістом вологи в продукті й також знижує вуглецевий слід технології одержання добрива.

Процес одержання фосфатовмісної оболонки полягає в наступному. В складі оболонки капсульованого добрива, яка складається з фосфорвмісної речовини та водного розчину гумату кальцію, в якості фосфорвмісної речовини використовують фосфат-глауконітовий концентрат з додаванням біочару у кількості 5–10 % від маси фосфат-глауконітового концентрату, а співвідношення суміші фосфат-глауконітового концентрату с біочаром та гумату кальцію складає 1:0,11. Склад оболонки формується наступним чином. Природний фосфат-глауконітовий концентрату подрібнюють до розміру частинок не більше 0,2 мм. До розміру 0,2 мм подрібнюють також біочар. У фосфат-глауконітовий концентрат додають 5–10 % до його маси біочару і ретельно перемішують. Одночасно готують пластифікатор на основі водного розчину гумату кальцію з фільтруванням його через сито з отворами 0.1 мм. У тарілчастому грануляторі, що обертається, гранули сечовини розміром 2–4 мм зволожують розчином пластифікатору, у кількості 10–13 % до маси сечовини. Пластифікатор розпилюють на шар гранул з одночасною подачею суміші порошкоподібного фосфат-глауконітового концентрату та біочару з розміром частинок не більше 200 мкм. Співвідношення компонентів для оболонки складає 1:0,11. Поступово формується фосфатовмісна оболонка на гранулі сечовини, при співвідношенні маси ядра гранули і маси покриття 1:(1,0–1,1). Сушать фосфатовмісну оболонку при температурі (64–66) °С. Запропоноване технічне рішення дозволяє одержувати комплексне органо-мінеральне добриво наступного складу: азоту не менше 23,0 %;  $P_2O_5$  не менше 7,0 %,  $K_2O$ –0,25 %. Вихід товарної фракції розміром гранул 2–4 мм становить більше 75 %. Статична міцність гранул не менше 1,0 кгс/гранулу. Використання запропонованого складу оболонки капсульованого добрива дозволяє отримати міцну з мікропорами оболонку, яка дозволяє підвищити пролонговану дію азотного ядра гранули, суттєво знизити

негативний вплив добрива на довкілля через підвищення коефіцієнту засвоюваності азотної, фосфатної та калійної складової добрива та підвищити якість рослинної продукції [30]. Крім того, при застосуванні пропонованого складу оболонки капсульованого добрива підвищується родючість ґрунту та зберігається гумус.

### **2.3. Експериментальні дослідження процесу гранулоутворення на тарілчастому грануляторі**

Розроблене технічне рішення з отримання капсульованого органічно-мінерального добрива полягає в формуванні фосфатовмісої оболонки на гранулі (прілли) карбаміду в тарілчастому грануляторі. Процес відбувається методом агломерації дрібнодисперсних порошків за смочування їх пластифікатором, у якості якого застосовується один із видів добрива або стимулятор росту.

Фізична модель капсулювання може бути представлена наступним чином. Попередньо готується (методом розсіву) фракція 2–4 мм гранул карбаміду, порошкоподібний фосфат-глауконітовий концентрат з розміром частинок менше 200 мкм, і водний розчин гумату кальцію, що містить до 85 % води. Капсулювання гранули карбаміду відбувається в тарілчастому грануляторі, на поверхні окатування за одочасного дозування в гранулятор гранул карбаміду, порошкоподібного фосфат-глауконітового концентрату і змочування поверхні гранул і порошку пластифікатором у вигляді водного розчину гумата кальцію. Під час обертання тарілки гранулятора зволожені гранули карбаміду рухаються (скочуються) за траєкторією неправильної спіралі, й по мірі збільшення у розмірах, наближаються до борта таріли та вивантажуються з неї. Процес росту гранул відбувається за рахунок налипання зволжених дрібних частинок фосфат-глауконітового концентрату. В процесі окатування гранул ці частинки ущільнюються на поверхні гранули, потім після наступного цикла зрошення і скатування гранули відбувається додаткове налипання з наступним ущільненням інших частинок і так до досягнення необхідної товщини оболонки гранули. І, за



певного, заданого діаметра, вона перекатується через борт таріли. Далі капсульована гранула направляється на сушіння з наступним виділенням товарної фракції. Реалізація процесу капсулювання на тарілчастому грануляторі має свої переваги, які полягають в тому, що гранули, досягнувши необхідного розміру, виводяться з апарату, а візуальний контроль процесу росту гранули дозволяє оперативно відслідковувати зміни технологічних параметрів капсулювання.

Таблиця 2.1 – Залежність міцності покриття гранул від кількості пластифікатора

Показники	Номер досліджу				
	1	2	3	4	5
Витрати пластифікатора, % від маси покриття	8	10	12,5	15	20
Міцність гранул, кгс/гранулу	0,7	1,32	1,5	1,05	0,95
Вологість готових гранул, %	0,1	0,25	0,7	0,65	0,53

Під час проведення лабораторних досліджень з отримання капсульованих органо-мінеральних добрив застосовували гранули карбаміду фракції 2–4 мм, які містили азоту 46,1 %, фосфат-глауконитовий концентрат із вмістом  $P_2O_5$  заг. дорівнює 14 % і розміром частинок не більше 200 мкм, гумати калію та кальцію з масовим вмістом вологи 85 і 87 % і масовою часткою гуматів калію і кальцію (в перерахунку на суху речовину) 18 % і 16 % відповідно. При цьому розчин гумату має рН рівний 10,8, що дозволяє розглядати його як блокіратор важких елементів у ґрунті. Порошок біочару готували шляхом розсіву до фракції менше 200 мкм, із вмістом вуглецю 93 %. Напрацювання гуматів калію і кальцію проводили на модельному гомогенізаторі.

Загальна методика проведення експерименту описана в роботі [31]. Вибір пластифікатора у вигляді гуматів калію і кальцію обумовлений позитивними результатами попередніх агрохімічних випробувань, що показали додаткове збільшення врожаю у порівнянні з пластифікатором на основі калію (водний

розчин Каліймагу). У першій серії дослідів визначали залежність міцності нанесеного покриття від кількості пластифікатора – гумата кальцію.

Як виходить із отриманих експериментальних даних, залежність міцності гранул від вологості фосфатовмісної суміші, що гранулюється, носить екстремальний характер і залежить від реологічних властивостей фосфатовмісної добавки, а оптимальна кількість води складає 12,5 %, що корелюється з даними інших досліджень – 8–15%. За вологості фосфатовмісної шихти менше 10 % не вся шихта рівномірно зволожується і не може бути залучена до процесу агломерації. При цьому зривається процес окатування, а міцність фосфатовмісної оболонки низька за невисокої адгезії оболонки до гранули карбаміду. За вологості шихти більше 15 % фосфатовмісна шихта гранулюється до вологості 12,5 %, а потім починається перезволоження шихти з утворенням гранул, що злиплися, і в кінцевому залишку до зриву процесу агломерації. Додаткові дослідження по введенню до складу оболонки вуглецевмісної нанопористої добавки – біочару – показали незначні зміни вологості шихти за збереження теденції оптимальної вологості. Цікавило визначення максимальної кількості біочару, яку можна вводити до складу фосфатовмісної оболонки. У досліді 1 біочар не вводили до складу оболонки (дослід порівняння). У дослідях 2–5 біочар вводився у різних кількостях за попереднього його перемішування з фосфат-глауконітовим концентратом. Результати експериментальних досліджень наведені в таблиці 2.2.

Як впливає із наведених результатів експериментів, для даної фосфатовмісної суміші максимальний вміст біочару, виходячи із характеристик міцності оболонки припустимо не більше 10 %. При цьому, згідно з даними інших досліджувачів [32], його вплив на підвищення ефективності добрива починає сказуватися вже за його наявності в 1 %. Отже, збільшення вмісту біочару з нанорозмірними порами дозволить більш ефективно використовувати поживні елементи гранули і, відповідно, збільшувати врожайність сільськогосподарських культур. Дане ствердження було підтверджено у ході

тестових вегетаційних дослідів і показало збільшення врожаю в порівнянні зі зразком без нанопористої добавки на 23 %.

Таблиця 2.2 – Залежність міцності покриття гранул від кількості біочару

Показники	Номер дослідів				
	1	2	3	4	5
Вміст біочару в складі оболонки, %	-	5	10	10	15
Витрата пластифікатора, %	25	25	25	30	25
Міцність гранул, кгс/гранулу	1,5	1,26	1,085	1,035	0,97
Вологість готових гранул	0,12	0,19	0,15	0,095	0,32

## **2.4 Методика інженерного розрахунку обладнання грануляційної установки**

### **2.4.1 Опис принципової технологічної схеми одержання органо-мінеральних добрив пролонгованої дії**

Проведені дослідження з розробки складу фосфатовмісного покриття, його інгредієнтів та основ технології процесу капсулювання гранул карбаміду дозволяють рекомендувати такі стадії одержання органо-мінерального добрива пролонгованої дії:

- складування та подача фосфатної сировини у виробництво;
- прийом, вивантаження та складування інгредієнтів сировини та передача її за необхідності, на додаткове приготування;
- приготування пластифікатора;
- приготування суміші сировинних компонентів;
- грануляція;
- сушіння;

- класифікація висушеного матеріалу, повернення на грануляцію в якості ретурну дрібних частинок, виділення гранул товарної фракції та спрямування їх як готового продукту на склад;

- складування, зберігання, упаковка та відвантаження готової продукції.

Проектна (орієнтовна) технологічна схема капсулювання гранул карбаміду з одержанням органо-мінерального добрива пролонгованої дії наведена на рис. 2.1:

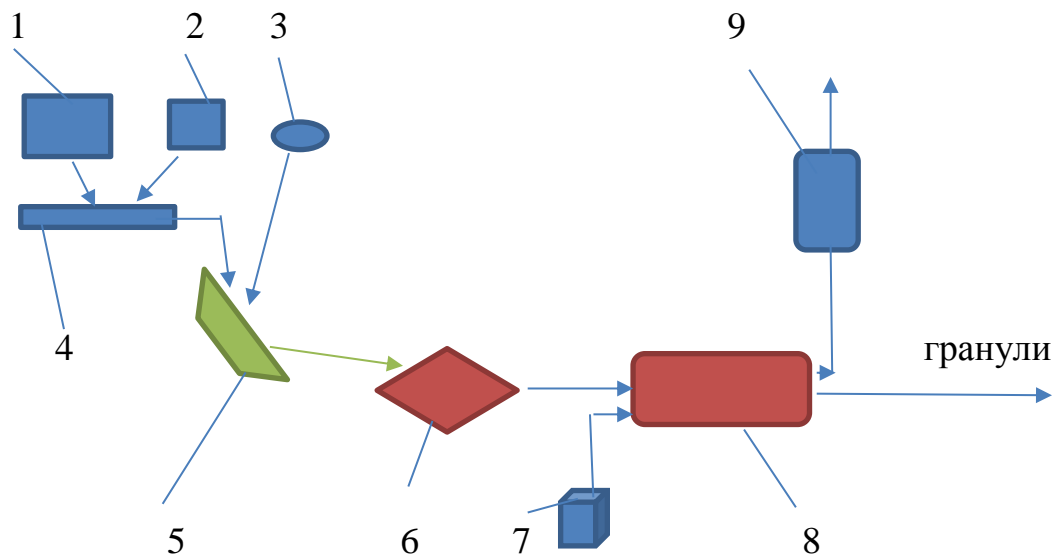


Рисунок 2.1 – Технологічна схема капсулювання гранул карбаміду з одержанням органо-мінерального добрива пролонгованої дії:

- 1 – бункер фосфориту; 2- бункер добавок; 3 – ємність гумату кальцію;  
4– змішувач; 5 – тарілчастий гранулятор; 6 – гуркіт; 7 – теплогенератор;  
8 – сушарка барабанна; 9 – повітряпромовач

Допоміжними стадіями технології є процеси сухого і мокрого очищення відпрацьованих сушильних газів і повітря, що відсмоктується із сушарки, з поверненням у виробництво продуктів уловлювання.

На всіх стадіях технології одержання органо-мінерального добрива пролонгованої дії відбуваються лише фізико-механічні процеси, хімічні процеси не протікають.

### ***Стадія складування та подачі фосфатної сировини у виробництво***

За своїм дисперсним складом фосфоритна сировина не завжди задовольняє вимогам технології грануляції, так як у ній може міститися недостатньо частинок розміром менше 0,071 мм і багато частинок більше 1 мм. Тому можливо необхідно буде передбачити процес розмелювання, де відбувається перетирання частинок фосфатної сировини тілами, що мелють. Вся маса меленого продукту повинна проходити через сито з розмірами отвору 0,4 мм. За зазначених умов формується достатня частка частинок, розмір яких менший за 0,071 мм. Підготовлена відповідним чином фосфоритна сировина направляється у бункер подачі фосфориту.

### ***Стадія приготування пластифікатора***

Пластифікатор використовують для зволоження шихти та створення передумов для її грануляції. На окремій установці одержують гумати калію або кальцію. Пластифікатор формується з гумату та рідких добавок, як то мікроелементний комплекс тощо. За результатами дослідно-промислових випробувань можливе опрацювання додавання у пластифікатор відпрацьованої скрубберної рідини системи мокрого пилеочищення сушильних газів.

### ***Стадія приготування суміші сировини для грануляції***

На цій стадії передбачається отримання в спеціальному апараті при механічному перемішуванні суміші фосфоритного борошна і добавок у вигляді біочару і пластифікатора. При реалізації цієї стадії технології важливо, щоб суміш мала вологість до 10 %, що близько до вимог технології процесу агломерації.

### ***Стадія грануляції та сушки***

У грануляторі шихта регульовано дозволюється пластифікатором. Під час руху маси у грануляторі протікає складний процес виникнення зародків покриття на гранулах карбаміду, їх збільшення у розмірі та певне ущільнення гранул.

Основну роль у процесі грануляції грають сили поверхневого натягу рідкої фази пластифікатора і сили адгезії між частинками фосфатовмісного покриття.

Під час руху в грануляторі частки покриття ущільнюються, на поверхню покриття видавлюється частина рідкої фази, що створює умови прилипання до неї нових дрібних частинок.

За недостатнього зволоження гранул формується пухке, маломіцне покриття, яке в ході транспортування та сушіння або призводить до розтріскання покриття з малою статичною міцністю, або отримання агломератів, які руйнуються в процесі сушіння.

За надмірної вологості шихти спочатку формуються перезволожені гранули, до яких прилипають як дрібні частинки вихідної сировини, а й великі зародки гранул. Із гранулятора в сушильний апарат надходять великі «малиноподібні» агломерати. Сушіння таких утворень утруднене, і вони є причиною збільшення маси некондиційних гранул.

За великого надлишку вологи в шихті процес грануляції повністю порушується і шихта у вигляді великих грудкоподібних частин виходить із гранулятора. Така перезволожена шихта забиває завантажувальний лоток в сушильний апарат та замазує поверхню сушильного апарату.

### ***Стадія сушіння***

У процесі сушіння гранульованих гранул у газову фазу виділяються пари води, кількість рідкої фази у фосфатовмісному покритті зменшується. За рахунок зменшення вмісту вологи в гранулах знижується вплив сил поверхневого натягу на міцність покриття. Міцність гранул знижується. Однак одночасно з видаленням вологи з рідкої фази пластифікатора починають виділятися кристали раніше розчинених солей. Зростають кристалики солей скріплюють частинки вихідних видів фосфатовмісної сировини. При цьому міцність гранул зростає. У цілому нині величина міцності гранул при видаленні вологи змінюється за екстримальному закону. Мінімальна міцність гранул відповідає вологості 4–6 %. Тому для отримання міцних гранул важливо, щоб після процесу сушіння їхня вологість не перевищувала 1,2 %.

### ***Стадія мокрої очистки газів***

Процес сушіння не супроводжується виділенням із сировини будь-яких газоподібних компонентів. Однак потоки газу захоплюють найбільш дрібні частинки фосфатовмісного покриття і виносять їх з сушильного апарату. Для запобігання викиду частинок сировини в атмосферу сушильні гази проходять сухе та вологе пилеочищення.

Найбільші частки сировинних компонентів уловлюються в батарейному циклоні і у складі ретуру повертаються в технологічний процес на стадію приготування суміші сировинних компонентів для грануляції. Найбільш дрібні частки сировини вловлюються на стадії мокрої очистки в скрубєрі при контакті з краплями зрошуючої скрубєрної рідини. При вологому очищенні частинки фосфоритного борошна залишаються у зваженому стані. Частина відпрацьованої скрубєрної рідини виводиться на ділянку приготування пластифікатора. Одночасно до циркуляційної системи вводиться технічна вода.

Відпрацьована скрубєрна рідина при правильній організації підживлення систем вологої очистки водою повністю використовується при приготуванні пластифікатора, який потім спрямовується в змішувач-зволожувач.

### **Проектний розрахунок основних апаратів технологічної лінії одержання органо-мінеральних добрив**

#### **Розрахунок тарілчастого гранулятора [31]**

##### **1. Матеріальні потоки тарілчастого гранулятора**

1.1. Номінальні витрати карбаміду, що подається на таріль, т/год.

1.2. Номінальна кількість пластифікатору, що подається на грануляцію, т/год.

1.3. Номінальна кількість шихти, що подається на грануляцію, т/год.

##### **2. Проектний розрахунок тарілчастого гранулятора.**

2.1. Продуктивність тарілчастого гранулятора визначається за емпіричним рівнянням:

$$P=k \times D^2 \quad (2.1)$$

де:  $P$  – продуктивність;

$D$  – діаметр тарілі;

$k$  – емпіричний коефіцієнт, приймається для агломерації (0,1÷1,5) т/м<sup>2</sup>год.

2.2. Висота борту обирається із співвідношення:  $h = (0,15 \div 0,22)D$

2.3. Робоче число обертів тарілі рівне:

$$n = (0,6 \div 0,9)n' \quad (2.2)$$

$$n' = 120 \sqrt{\frac{\sin\beta - \cos\beta \times \text{tg}\alpha}{D}} \quad (2.3)$$

де:  $\beta$  – кут нахилу тарілі,  $\alpha$  – кут природного укосу матеріалу.

Для дослідної установки необхідно передбачити можливість зміни обертів у межах 11 ÷ 30 хв.

2.4. Основним рівнянням, що зв'язує оптимальні параметри роботи гранулятора, є:

$$\frac{\omega^2 R}{g} = (\sin\beta - \cos\beta \times \text{tg}\alpha) \times \cos\varphi \quad (2.4)$$

де:  $\omega$  – кутова швидкість обертання тарілі;

$R$  – радіус тарілі;

$g$  – кут вільного падіння;

$\varphi$  – кут відриву мілких частинок від борту тарілі за її обертання в режимі, що встановився.

2.5. Кількість матеріалу а тарілі.

2.5.1. У нерухомому стані в нахиленій тарілі матеріал, що гранулюється, повинен займати половину дна тарілі. При цьому об'єм матеріалу:

$$V = \frac{2}{3} \times R^2 \times h. \quad (2.5)$$



Під час обертання тарілі об'єм шару збільшується на 10–12 %.

### Барабанна сушарка

Алгоритм розрахунку сушарки включає кілька блоків:

- розрахунок характеристик одержуваного сушильного газу;
- розрахунки матеріального балансу процесу сушіння;
- розрахунки інтенсивності процесу сушіння з оцінкою
- продуктивність існуючого сушильного барабана.

#### *Розрахунок характеристик одержуваного сушильного газу*

Вихідні дані для розрахунку процесу спалювання палива:

Склад природного газу приймаємо, виходячи з прикладу розрахунку, виконаного раніше НІУІФ, % об'єм.

$\text{CH}_4 - 89,7$ ;  $\text{C}_2\text{H}_6 - 4,46$ ;  $\text{C}_3\text{H}_8 - 1,81$ ;  $\text{C}_4\text{H}_{10} - 0,72$ ;  $\text{N}_2 - 3,16$ ;  $\text{CO}_2 - 0,15$ .

Для подальшого стикування розрахунків горіння з розрахунком теплогенератора переходимо до оперування поняттям «масова частка, %».

Перерахунок складу газу в масові частки здійснюємо за формулою:

$$M_i = r_i \cdot \mu_i / \sum r_i \cdot \mu_i \quad (2.6)$$

Молекулярна маса газової суміші (палива)  $M_i$ , кг/моль:

$$\begin{aligned} \mu_c &= \sum r_i \cdot \mu_i = 0,01 \times (89,7 \times 16 + 4,46 \times 30 + 1,81 \times 44 + \\ &+ 0,72 \times 58 + 3,16 \times 28 + 0,15 \times 44) = \\ &= 14,352 + 1,3381 + 0,7964 + 0,4176 + 0,8848 + 0,066 \approx 17,85 \end{aligned} \quad (2.7)$$

де:  $r_i$  - об'ємна частка  $i$ - того компонента в газовій суміші, дол.од.

$\mu_i$  - молекулярна маса  $i$ -того компонента в газовій суміші

Розрахункова щільність газу, кг/нм<sup>3</sup>

$$\rho_{п.г.} = \mu_c / 22,4 = 17,85 / 22,4 = 0,797 \quad (2.8)$$

Склад палива, % мас.

[CH<sub>4</sub>] – 80,38; [C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>] – 7,49; [C<sub>3</sub>H<sub>8</sub>] – 4,46; [C<sub>4</sub>H<sub>10</sub>] – 2,34; [N<sub>2</sub>] – 4,96; [CO<sub>2</sub>]-0,37

Перерахунок об'ємних часток у масові частки % виконані за формулою:

$$M_i = 100 \times r_i \times \mu_i / \sum r_i \times \mu_i = r_i \times \mu_i / 17,85 \quad (2.9)$$

де:  $r_i$  – об'ємна частка  $i$ - того компонента в газовій суміші, дол.од;  
 $\mu_i$  – молекулярна маса  $i$ -того компонента в газовій суміші;  
 17,85 – розрахована молекулярна маса суміші компонентів, кг/моль

У подальших розрахунках використовуємо значення вмісту компонентів газу тільки в масових частках (%<sub>мас</sub>).

Теоретична потреба повітря для спалювання газового палива [5], кг/кг:

$$\begin{aligned} L_o &= 1,38 \times \sum [(m_i + n_i/4)/(12m_i+n_i)] \times [C_m H_n] = \quad (2.10) \\ &= 1,38 \times \{ [(1 + 4/4)/16] \times 80,38 + [(2 + 6/4)/30] \times 7,49 + \\ &\quad + [(3 + 8/4)/44] \times 4,46 + [(4 + 10/4)/58] \times 2,34 \} = \\ &= 1,38 \times \{ 10,0475 + 0,8738 + 0,5068 + 0,2622 \} = 1,38 \times 11,69 = 16,1327, \end{aligned}$$

де:  $m_i$  – число атомів вуглецю у вуглеводневому компоненті;

$n_i$  – атомів водню у вуглеводневому компоненті.

1,38- щільність повітря за нормальних умов, кг/нм<sup>3</sup>

Маса CO<sub>2</sub> в продуктах згоряння, кг/кг газу:

$$\begin{aligned}
 G_{\text{CO}_2} &= 0,01 \times [\text{CO}_2] + (44 \times 0,01) \times \{ \Sigma [\text{C}_m\text{H}_n] / (12m_i + n_i) \} = (2.11) \\
 &= 0,01 \times 0,37 + 0,44 \times \{ 80,38 / (12 \times 1 + 4) + 7,49 / (12 \times 2 + 6) + \\
 &\quad + 4,46 / (12 \times 3 + 8) + 2,34 / (12 \times 4 + 10) \} = \\
 &= 0,0037 + 0,44 \times \{ 5,0237 + 0,2497 + 0,10136 + 0,0403 \} = \\
 &= 0,0037 + 0,44 \times 5,4151 = 0,0037 + 2,3826 = 2,3863
 \end{aligned}$$

Маса  $\text{N}_2$  в продуктах згоряння, кг/кг газу:

$$\begin{aligned}
 G_{\text{N}} &= 0,768 L_o + 0,01 \times [\text{N}_2] = (2.12) \\
 &= 0,768 \times 16,1327 + 0,01 \times 4,96 = 12,39 + 0,0496 = 12,4395
 \end{aligned}$$

Маса  $\text{H}_2\text{O}$  в продуктах згоряння при теоретичній витраті повітря, кг/кг газу.

У першому наближенні не враховуємо у розрахунках вологовміст навколишнього повітря.

$$\begin{aligned}
 G_{\text{пар}} &= 0,09 \times \{ \Sigma n \times [\text{C}_m\text{H}_n] / (12m_i + n_i) \} = (2.13) \\
 &= 0,09 \times \{ 4 \times 80,38 / (12 \times 1 + 4) + 6 \times 7,49 / (12 \times 2 + 6) + 8 \times 4,46 / (12 \times 3 + 8) + \\
 &\quad + 10 \times 2,34 / (12 \times 4 + 10) \} = 0,09 \times \{ 20,095 + 1,498 + 0,8109 + 0,4034 \} = \\
 &= 0,09 \times 22,807 = 2,0526
 \end{aligned}$$

Перевірка матеріального балансу процесу спалювання 1 кг палива:

- Прихід:

$$1 + 16,1327 = 17,1327,$$

де: 1 – маса природного газу прийнята в розрахунку, кг

16,1327 – маса повітря теоретично необхідна для спалювання 1 кг газу, кг/кг п.г.

- Витрата:

$$2,3863 + 12,4395 + 2,0526 = 16,978$$

-Дебаланс, %:

$$100 \times 0,2543/17,1327 = 1,46 \%$$

Розбіжність у межах припустимої помилки інженерних розрахунків

2.11 Визначаємо розрахункову теплоту згоряння палива [33], кДж/кг

$$\begin{aligned} Q_{p^H} &= 22,4 \times 4,1868 \times \{5,32 \times [CH_4] + 5,05 \times [C_2H_6] + 4,94 \times [C_3H_8] + \\ &+ 4,87 \times [C_4H_{10}]\} = 22,4 \times 4,1868 \times (5,32 \times 80,38 + 5,05 \times 7,49 + \\ &+ 4,94 \times 4,46 + 4,87 \times 2,34) = 22,4 \times 4,1868 \times (427,6216 + 37,8245 + \\ &+ 22,0324 + 11,3958) = 22,4 \times 4,1868 \times 498,874 = 4,1868 \times 11174,78 = \\ &= 46786,585 \end{aligned} \quad (2.14)$$

де: 4,1868 - коефіцієнт перерахунку ккал в кДж

Теплота згоряння палива в розрахунку кДж/нм<sup>3</sup>

$$46786,587 \times \rho = 46786,587 \times 0,797 = 37288,9,$$

де:  $\rho = 0,797$  – щільність природного газу, кг/м<sup>3</sup>

Теплота згоряння в ккал/нм<sup>3</sup>:

$$37288,9 / 4,1868 = 8906$$

Значення теплоти згоряння на 3,6 % вище, ніж теплота згоряння природного газу прийнятого складу, отримана за розрахунками НІУІФ (8500 ккал/нм<sup>3</sup>). Відмінності перебувають у допустимому для інженерних розрахунків інтервалі.

### Розрахунок технологічних можливостей сушильного апарату

Проектний розрахунок ведемо для варіанта використання в якості газів розведення повітря взятого безпосередньо з атмосфери. Враховуючи нечіткість інформації для даних розрахунків, як найбільш достовірну величину прийmemo, що температура сушильних газів на вході в сушильний барабан 500 °С.

Оцінюємо загальний коефіцієнт надлишку повітря для забезпечення надходження в сушильний апарат топкових газів із зазначеною температурою. Вологовміст атмосферного повітря в розрахунках не беремо до уваги.

Таблиця 2.3 – Значення середніх масових ізобарних теплоємностей сполук використовуваних у розрахунку, кДж/(кг × К) [33]

Компонент	Температурний інтервал, °С				
	0-20	0-300	0-400	0-500	0-600
CH <sub>4</sub>	2,13	-	-	-	-
Повітря	1,0048	1,0174	1,0299	1,0383	1,0509
N <sub>2</sub>	1,00383	1,0488	1,055	1,0676	1,076
CO <sub>2</sub>	0,8164	0,9504	0,9836	1,0132	1,0383
H <sub>2</sub> O	1,8589	1,9176	1,9468	1,9861	2,0096

Сума ентальпій природного газу та повітря (первинного та вторинного), що надходять у теплогенератор (фізичний вміст природного газу та повітря), кДж/кг газу

$$I_0 = G_{\text{пг}} \times C_{\text{пг}} \times t_0 + \alpha \times L_0 \times C_{\text{взд}} \times t_0 = \quad (2.15)$$

$$1 \times 2,13 \times 20 + \alpha \times 16,1327 \times 1,0048 \times 20 = 42,6 + \alpha \times 324,2,$$

де:  $G_{\text{пг}} = 1$  – маса природного, що спалюється, газу прийнята в розрахунках даного розділу, кг;

$C_{\text{пг}} = 2,13$  теплоємність природного газу на вході в теплогенератор при 20 °С, кДж/(кг×К);

$t_o = 20$  – температура природного газу та повітря на вході в теплогенератор, °С;

$C_{\text{взд}} = 1,004813$  – теплоємність повітря на вході в теплогенератор при 20 °С, кДж/(кг×К);

$L_o = 16,1327$  – теоретична витрата повітря на повне спалювання 1 кг природного газу, кг/кг п.г.

$\alpha$  – сумарний коефіцієнт надлишку повітря (первинного та вторинного) що подається в теплогенератор (підлягає визначенню);

Сумарний прихід тепла в топку, кДж/кг газу

$$Q_{\Sigma} = Q_p^H + I_o = 46786,585 + 42,6 + 324,20 \times \alpha = \quad (2.16)$$

$$= 46829,185 + 324,20 \times \alpha \quad (a)$$

3.5 Ентальпія топкових газів на вході в сушильний барабан, кДж/кг п.г.

$$I_{\text{ввых}} = G_{\text{пар}} \times C_{\text{пар}} \times t_{\text{ввых}} + G_{\text{CO}_2} \times C_{\text{CO}_2} \times t_{\text{ввых}} + G_{\text{N}_2} \times C_{\text{N}_2} \times t_{\text{ввых}} + \quad (2.17)$$

$$+ (\alpha - 1) \times L_o \times C_{\text{взд}} \times t_{\text{ввых}} = 2,0526 \times 1,9861 \times 500 +$$

$$+ 2,3863 \times 1,0132 \times 500 + 12,4395 \times 1,0676 \times 500 +$$

$$+ (\alpha - 1) \times 16,1327 \times 1,0383 \times 500 =$$

$$= 2038,33 + 1208,90 + 6640,21 + 8375,29 \times (\alpha - 1) =$$

$$= 9887,44 + 8375,29 \times (\alpha - 1) =$$

$$= 9887,44 + 8375,29\alpha - 8375,29 = 1512,15 + 8375,29 \times \alpha, \quad (б)$$

де:  $C_{\text{пар}} = 1,9176$ ,  $C_{\text{CO}_2} = 1,0132$ ;  $C_{\text{N}_2} = 1,0676$ ;

$C_{\text{взд}} = 1,0383$  – відповідно середні масові теплоємності компонентів сушильного газу в інтервалі температур (0-500) °С.

Прирівнюємо рівняння (а) і (б) та визначаємо розрахункове значення сумарного коефіцієнта надлишку повітря  $\alpha$ :

$$46829,185 + 324,20 \times \alpha = 1512,15 + 8375,29 \times \alpha$$

$$\alpha = (46829,185 - 1512,15)/(8375,29 - 324,2) = 45317,035/8051,09 = 5,629$$

Уточнюємо значення  $\alpha$ , ввівши поняття  $\eta_T$  – коефіцієнт ефективності топки.

Приймаємо коефіцієнт ефективності топки рівним 0,95, тоді отримуємо відкориговане значення кількості тепла, яке корисно виводиться з теплогенератора, кДж/кг п.г.

$$0,95 \times (46829,185 + 324,2131 \times \alpha_p) = 44487,726 + 308,00 \times \alpha_p$$

Уточнене значення коефіцієнта надлишку повітря знаходимо з балансу приходу та витрати тепла:

$$44487,726 + 308,00 \times \alpha_p = 1512,15 + 8375,29 \times \alpha_p$$

Звідки визначаємо  $\alpha_p$

$$\alpha_p = (44487,726 - 1512,15)/(8375,29 - 308,00) =$$

$$= 42975,58 / 8067,29 = 5,327$$

Ентальпія сушильних газів на вході в сушильний барабан при температурі 500 °С під час спалювання 1 кг палива, кДж/кг газу

$$I_{\text{вход}} = 1512,15 + 8375,29 \times \alpha_p = 1512,15 + 8375,29 \times 5,327 =$$

$$= 1512,15 + 44615,17 = 46127,32,$$

Приймаємо, що пальник працюватиме в умовах оптимального горіння за умови підтримання значення первинного повітря  $\alpha_1$  на рівні 1,1.

Фактичне надходження первинного повітря на пальник, кг/кг п.г.:

$$G_{\text{взд1}} = L_o \times \alpha_1 = 16,1327 \times 1,1 = 17,746 \quad (2.18)$$

Вторинне дуття має подавати в топку повітря розведення у кількості, кг/кг топлива:

$$G_{\text{взд2}} = L_o \times (\alpha_p - \alpha_1) = 16,1327 \times (5,327 - 1,1) = 68,19 \quad (2.19)$$

Орієнтовна теплова потужність теплогенератора, МВт

$$Q_{\text{тг}} = 3 \text{ МВт или } 3000 \text{ кДж/с}$$

Маса палива, що спалюється в теплогенераторі, кг/с

$$q_{\text{тг}} = Q_{\text{тг}} / I_{\text{вход}} = 3000 / 46127,32 = 0,06504, \quad (2.20)$$

де:  $Q_{\text{тг}} = 3000$  - теплова потужність теплогенератора, кДж/с

$I_{\text{вход}} = 46127,32$  – ентальпія продуктів згорання на вході в сушарку при спалюванні 1 кг природного газу, кДж/кг п.г.

Масова годинна витрата палива, кг/ч

$$G_{\text{т}} = 3600 \times q_{\text{тг}} = 3600 * 0,06504 = 234,13 \quad (2.21)$$

Об'ємна максимальна годинна витрата палива в натурі,  $\text{нм}^3/\text{ч}$ :

$$V_{\text{т}} = G_{\text{т}} / \rho_{\text{п.г.}} = 234,13 / 0,797 = 293,77, \quad (2.22)$$



де:  $\rho_{п.г.} = 0,797$  – щільність природного газу,  $\text{кг/нм}^3$ .

Розрахункові значення об'ємної витрати первинної та вторинної повітря під час роботи сушильного барабана на максимальному навантаженні. Подача первинного повітря при  $\alpha_1=1,1$ ,  $\text{м}^3/\text{ч}$

$$16,1327 \times 1,1 \times 234,13 : 1,205 = 3448,02$$

де: 1,1-коефіцієнт надлишку первинного воздуха на горелку;

16,1327- теоретична потреба повітря для спалення 1 кг газу прийнятого складу (см п.5),  $\text{кг/кг}$  газу;

234,13- максимальний годинна витрата палива,  $\text{кг/год}$ ;

1,205 –густина повітря при  $20^\circ\text{C}$ ,  $\text{кг/м}^3$  [34]

Подача вторинного повітря розведення,  $\text{нм}^3/\text{ч}$ :

$$16,1327 \times (5,327-1,1) \times 234,13 : 1,205 = 13249,8$$

де: 5,327 - сумарний коефіцієнт надлишку повітря, що подається в теплогенератор  $\alpha_p$ ;

1,1- коефіцієнт надлишку повітря при первинному дутті  $\alpha_1$ .

Сумарна максимальна подача повітря у теплогенератор,  $\text{нм}^3/\text{ч}$

$$3448,02 + 13249,8 = 16697,82$$

Розрахункову максимальну подачу повітря до теплогенератора потрібно порівнювати з вихідними даними для розрахунку.

### Визначення потенціалу теплогенератора для процесу сушіння

Продуктивність сушильної установки залежить від двох характеристик:

- від потенційної теплової характеристики теплогенератора;
- від інтенсивності процесів, що протікають в сушильному апараті масо-теплообміну між матеріалом, що висушується, і сушильними газами.

Визначення максимальної кількості води, яку можуть випарувати сушильні гази, що виходять із теплогенератора в сушильний барабан, кг/год:

$$M_{\text{в.м.}} = G_{\text{т}} \times I_{\text{виход}} / q_{\text{исп}} \quad (2.23)$$

де:  $q_{\text{исп}}$  – реальні питомі витрати теплової енергії на випаровування 1 кг вологи в сушарках середньої калоричної ефективності [35], кДж/кг;

$G_{\text{т}}$  - максимальна витрата палива, кг/ч

$I_{\text{виход}}$  – ентальпія сушильних газів на виході з теплогенератора, кДж/кг п.г.

Максимальна кількість вологої шихти, яку здатні висушити сушильні гази.

Маса води в 1 т вихідної вологої шихти, кг/т

$$M_{\text{вм}} = 1000 \times W_{\text{н}}, \quad (2.24)$$

де:  $W_{\text{н}}$  - початкова вологість шихти, дол.од

Маса сухої речовини в 1 т вологої шихти, кг/т

$$M_{\text{с}} = 1000 - W \quad (2.25)$$

Масу вологи  $W$  у висушеній шихті при сушінні 1 т вологої шихти визначаємо з формули, кг

$$W^i / (M_{\text{с}} + W^i) = 0,025, \quad (2.26)$$

де: 0,025 - кінцева вологість у висушеній гранулі, дол. од.

Маса висушеної шихти при сушінні 1 т вологої шихти, кг

$$M_{\Gamma} = M_c + W^i \quad (2.27)$$

Маса води, що видаляється при сушінні 1 т вологої шихти, кг

$$M_B = W - W^i \quad (2.28)$$

Максимальна маса вологої шихти, яку можна висушити в апараті при повному використанні теплової енергії сушильних газів, т

$$M_T = M_{BM} / M_B \quad (2.29)$$

де:  $M_{BM}$  - максимальна кількість води, яку здатні випарувати сушильні гази, що виходять з теплогенератора, кг/год.

$M_B$  – маса води, що випаровується з 1 т вологої шихти.

Якщо прийняти, що ретурність технології одержання гранульованого органо-мінерального добрива 1:0,5, то максимальна кількість нових гранул, які здатні висушити сушильні гази, т/год.

$$G = M_T / 1,5 \quad (2.30)$$

У складі свіжої вологої шихти міститься маса сухого пластифікатора та фосфориту, т/год

$$M_3 = G \times (1 - W) \quad (2.31)$$

Максимальна продуктивність стадії сушіння по готовому продукту (після класифікатора) при повному використанні теплоти сушильних газів, що виробляються теплогенератором, т/год.

$$G_{\max} = 0,001 \times G \times M_r \quad (2.32)$$

### **Оцінка потенціалу барабанної сушарки**

Як правило, на існуючих сушильних установках теплова потужність теплогенераторів рідко буває фактором, що обмежує продуктивність технологічної лінії сушіння. Основною лімітуючою стадією процесу сушіння зазвичай є інтенсивність тепло-масообмінних процесів в барабані сушарки. Інтенсивність випаровування вологи в апараті залежить як від конструктивних особливостей барабану, так і від режимів руху сушильного газу і матеріалу, що висушується.

Розрахунок апаратів для реалізації процесів сушіння під час випуску нових видів продукції, як правило, потребує проведення великого обсягу експериментів, у тому числі і на модельних сушильних агрегатах. За отриманими експериментальними даними задаються вимоги до габаритів та внутрішньої конструкції сушильного агрегату.

Водночас найчастіше технологічні схеми сушильних установок включають типові сушильні апарати. У таких апаратах рідко змінюють внутрішні пристрої, насадки, пересипні лопатки тощо. У зазначених випадках пропонуються різні наближені інженерні рішення, які потім перевіряються в ході пуско-налагоджувальних робіт на сушильних установках.

Найбільш перспективним є напрямок вибору типу сушильного апарату та його конструкції за аналогією. У технічній та довідковій літературі знаходяться приклади реалізації процесів сушіння для матеріалів, фізико-механічні та фізико-хімічні властивості яких близькі до властивостей товару, для якого розробляється нове технічне рішення. Надалі проводиться обґрунтованість

обраного типу сушильного апарату та проводиться розрахунок прогнозованих технологічних характеристик роботи обраного апарату за нових умов.

Основною характерною величиною для барабанних сушарок є напруга об'єму апарату з вологи [36],  $\text{кг}/(\text{м}^3 \times \text{год})$

$$A = W_{\text{ив}} / (V_{\text{сп}} \times \tau), \quad (2.33)$$

де:  $W_{\text{ив}}$  – маса води, що випарувалася, в барабанній сушарці, кг

$V_{\text{сп}}$  – об'єм сушильного простору барабана,  $\text{м}^3$

$\tau$  – час сушки, год.

Сушильний простір барабанної сушарки  $V_{\text{бс}}$  зазвичай розраховується, виходячи з проектної продуктивності установки по висушуваній волозі і умов теплообміну між сушильними газами і агломератами сировини, що висушуються.

При проектному розрахунку доцільно вирішувати зворотну задачу, попередньо задавшись габаритами барабану, визначити його продуктивність по випаровуваній волозі.

Аналіз номенклатури барабанних сушарок заводу-виробника показує, що є певна кореляція між геометричним об'ємом барабанної сушарки і його сушильним простором (таблиця 2.4 [36]), з середнім коефіцієнтом кореляції, який близький до значення 0,998.

Розглядаючи відомості про напругу барабанної сушарки по зніманню вологи, об'єктивно можна відзначити, що найбільш ймовірна величина повинна прогнозуватися на рівні  $(50 \div 65) \text{кг}/(\text{м}^3 \times \text{год})$

Кількість вологи, за прогнозом, яка може випаруватися в барабанній сушарці за 1 годину при прийнятих припущеннях,  $\text{кг}/\text{год}$ .

$$W_{\text{ив}} = A \times V_{\text{сб}} \times \tau \quad (2.34)$$

Таблиця 2.4 - Характеристики барабанних сушарок, які виробляються заводом «Прогрес», м Бердичів, Україна

Тип сушарки	7450	7410	6343
Диаметр, м	1,5	1,8	2,2
Довжина, м	8	12	12
Об'єм геометричний $V_{\Gamma}$ , м <sup>3</sup>	14,73	30,54	45,66
Об'єм сушильного простору $V_{\text{сп}}$ , м <sup>3</sup>	14,1	30,5	45,6
Співвідношення $V_{\text{сп}}/V_{\Gamma}$	0,997	0,9988	0,9996
Швидкість обертання, об/хв.	5	5	5
Продуктивність по вологі, кг/ч	700	1100	1640

Таблиця 2.5 - Характеристики процесів сушіння деяких матеріалів аналогів барабанних сушарок

Матеріал	Вологість матеріалу початкова $\omega_{\text{нач}}$ , %	Вологість матеріалу кінцева $\omega_{\text{кон}}$ , %	Температура сушильних газів		Розмір куска, мм	A, кг/(м <sup>3</sup> ×ГОД)
			$T_{\text{поч.}}$	$T_{\text{кінц.}}$		
Глина	22	5	600÷700	80÷100	-	50÷60
Вапняк	8-10	0,5	800	120	0-20	30÷40
Концентрат сульфатний	12	3	500÷600	100	200	60÷70
Руда магнітогорська	6,0	0,5	730	Немає даних	0,5	65
Фосфорити	6,0	0,5	600	100	-	45÷65

Определяем количество влажной шихты способной быть высушенной в сушильном барабане, т/ч

$$G_{\text{вш}} = W_{\text{ив}} / M_{\text{в}} \quad (2.35)$$

де:  $M_v$  – маса води, що випаровується з 1 т вологої шихти, кг/т.

Якщо прийняти, що ретурність технології одержання гранульованого добрива 1:0,5, то максимальна кількість свіжої вологої шихти, яку здатні висушити сушильні гази, т/год.

$$G = G_{вш}/1,5 \quad (2.36)$$

У складі свіжої вологої шихти міститься маса сухого пластифікатора та фосфориту, т/год

$$G \times (1-W) = M_{сш} \quad (2.37)$$

Максимальна продуктивність стадії сушіння готового продукту (після класифікатора) при використанні технологічного потенціалу барабанної сушарки, т/ч

$$W_{\max} = 0,001 \times M_{сш} \times M_r \quad (2.38)$$

де:  $M_r$  – маса висушеного готового продукту, що отримується при сушінні 1 т вологої шихти, кг/т

Проведені за розрахунки за представленою методикою дозволяють при проєктному розрахунку технологічної схеми процесу одержання гранульованих продуктів провести підбір барабанної сушарки по каталогу заводу-виробника.

## **Розрахунок повітряпромивача потужністю**

*Вибір типу таріли.*

Мета розрахунку розробка оптимальних гідродинамічних параметрів процесу абсорбції й конструкції повітряпромивача, що забезпечують заданий процес очищення технологічного повітря від пилу карбаміду і фосфориту.

Із розрахунку фазової рівноваги рідина-пар бінарної системи карбамід-вода випливає, що для поглинання карбаміду достатньо мати дві реальних таріли. Оскільки фосфорит повільно розчиняється у воді, то розрахунки будемо вести по складовій карбаміду. Найбільш простим типом таріли є провальна тарілка. Однак, у цьому випадку виникають складності в частині розподілення рідкої фази на верхній тарілці. У зв'язку з цим є доцільним застосування сітчастої тарілки.

*Гідродинамічні характеристики сітчастої тарілки*

У залежності від швидкості потоку газу на тарілці встановлюється нерівномірний або рівномірний режим. Нерівномірний режим встановлюється за малих швидкостей газу. У сітчастій тарілці рідина «провалюється» через отвори і не встигає накопичуватись на тарілці.

При збільшенні швидкості газу вище певної величини нерівномірний режим роботи переходить у рівномірний. Швидкість, за якої спостерігається цей перехід, називається нижньою граничною швидкістю існування рівномірного режиму. Для колон, що працюють за атмосферного тиску, нижня гранична швидкість існування рівномірного режиму знаходиться у межах 0,4–0,5 м/с у вільному перетині колони.

Максимально допустима швидкість газу, за якої ще існує рівномірний режим, визначається фізичними властивостями компонентів, висотою сепараційного простору, конструкцією тарілки, величиною допустимого винесення та ін. За подальшого збільшення швидкості газу рівномірний режим переходить у режим фонтанування, що супроводжується великим бризковинесенням.

Під час вибору швидкості у вільному перетині колони слід виходити з умов роботи тарілки у рівномірному режимі або режимі фонтанування.



Для колон, що працюють за атмосферного тиску, рекомендується швидкість газу у вільному перетині 0,9–1,4 м/с, відстань між тарілками 0,08–0,2 м. Під час роботи під вакуумом або під тиском швидкість слід, відповідно, збільшувати або зменшувати пропорційно зменшенню або збільшенню густини газу.

Верхню граничну швидкість повітря за рівномірного режиму колони з сітчастими тарілками можна визначити за рівнянням:

$$\omega = 0,05 \sqrt{\frac{\rho_{\text{ж}}}{\rho_{\text{в}}}}, \quad (2.39)$$

де:  $\rho_{\text{ж}}$  – густина рідини, кг/м<sup>3</sup>;

$\rho_{\text{в}}$  – густина повітря, кг/м<sup>3</sup>.

Робочу швидкість повітря приймають 90 % від верхньої граничної швидкості для верхньої і нижньої тарілки.

Порівнюючи значення швидкостей, треба визначити щоб рівномірний режим колони існував при однаковій швидкості, м/с.

Діаметр апарату за витрати повітря  $V_{\text{п}}$  складе, м:

$$D = \sqrt{\frac{V_{\text{п}}}{3600 \cdot 0,785 \cdot \omega r}}. \quad (2.40)$$

Гідравлічний опір тарілки складе:

$$\Delta P_{\text{T}} = \Delta P_{\text{сух}} + \Delta P_{\text{б}} + \Delta P_{\text{СТ}} \quad (2.41)$$

де:  $\Delta P_{\text{сух}}$  – опір сухої тарілки;

$\Delta P_{\text{б}}$  – опір, що викликається силами поверхневого натягу;

$\Delta P_{\text{СТ}}$  – статичний опір шару рідини на тарілці.

$$\Delta P_{\text{T}} = \alpha \frac{\omega_{\text{отв}}^2 \rho_{\text{в}}}{2}, \text{ Н/м}^2 \quad (2.42)$$

де:  $\alpha$  – коефіцієнт опору за вільного перетину отвору, 16,5 %;  
 $\omega$  – швидкість повітря в отворах, м/с;  
 $\rho_B$  – густина повітря, кг/м<sup>3</sup>;

$$\Delta P_{\text{сух}} = \alpha \frac{\omega^2 \times \rho_B}{2} \text{ мм вод. ст.} \quad (2.43)$$

1 Н/м<sup>2</sup> = 0,102 мм вод.ст.

$$\Delta P_b = \frac{4\sigma}{d_{\text{отв}}}, \text{ Н/м}^2,$$

де:  $\sigma$  – поверхневий натяг розчину карбаміду, Н/м;  
 $d$  – діаметр отворів тарілі, м.

$$\Delta P_{\text{СТ}} = h_{\text{пер}} \cdot \rho_{\text{г.ж.}} \cdot g, \text{ Н/м}, \quad (2.44)$$

де:  $h_{\text{пер}}$  – висота переливу, м;  
 $\rho_{\text{г.ж.}}$  – густина газорідинної фази на тарілці.

$$\rho_{\text{г.ж.}} = 0,43 \left( \frac{G_{\text{р-ну}}}{G_B} \right)^{0,325} \cdot \left( \frac{\rho_B}{\rho_{\text{р-ну}}} \right)^{0,18} \cdot \left( \frac{\mu_{\text{р-ну}}}{\mu_B} \right)^{0,036} \cdot \rho_{\text{р-ну}} \quad (2.45)$$

де:  $G_{\text{р-ну}}$  – кількість рідкої фази, кг/с;  
 $G_B$  – кількість повітря, кг/с;  
 $\rho_{\text{р-ну}}$  – густина рідини, г/м<sup>3</sup>;  
 $\rho_B$  – густина повітря, г/м<sup>3</sup>;  
 $\mu_{\text{р-ну}}$  – в'язкість рідини, Н·с/м<sup>2</sup>;  
 $\mu_B$  – в'язкість повітря, Н·с/м<sup>2</sup>;

Гідравлічний опір сітчастої тарілки можна визначити за критеріальним рівнянням:

$$\frac{\Delta P_{\Gamma} h_{\text{пер}}}{\sigma} = 0,46 Fr^{0,64} K_{\sigma}^{0,91} \left( \frac{\rho_{\text{В}}}{\rho_{\text{р-ну}}} \right)^{0,4} \left( \frac{G_{\text{р-ну}}}{G_{\text{В}}} \right)^{0,135} \left( \frac{d_{\text{отв}}}{\delta} \right)^{0,12}, \quad (2.46)$$

де:  $Fr = \frac{\omega_{\text{отв}}^2}{g \cdot h_{\text{пер}}};$

$$K_{\sigma} = \frac{\rho_{\text{р-ну}} \cdot g \cdot h_{\text{пер}}^2}{\sigma};$$

$\delta$ —товщина тарілки, м.

Мінімальна відстань між тарілками визначаємо за рівнянням:

$$H_{\text{T}} = 2,2H_{\text{ПН}}, \text{ м}, \quad (2.47)$$

де:  $H_{\text{ПН}}$  – висота шару піни на тарілці:

$$H_{\text{ПН}} = 4 \cdot d_e \left( \frac{\omega_{\text{отв}}^2}{g \cdot d_e} \right)^{0,2}; \quad (2.48)$$

Якщо у галузевому стандарті на колони тарілчастих апаратів відсутні дані для діаметрів більше 4 м, то периметр зливу і його відносний перетин потрібно визначати шляхом екстраполяції.

За наявності двох повітряпромивачів витрати потоків на кожний апарат зменшаться вдвічі.

Виходячи з отриманого результату доцільно обирати стандартну тарілку згідно з ГОСТ 26-01-1488-83.

### 3 ДОСЛІДЖЕННЯ ФАЗОВОГО І ХІМІЧНОГО СКЛАДУ ТА КРИСТАЛІЧНОЇ СТРУКТУРИ СКЛАДНИХ ДОБРІВ ЗА ДОПОМОГОЮ СПЕКТРОМЕТРІЇ І ЕЛЕКТРОННОЇ МІКРОСКОПІЇ РІЗНИХ ТИПІВ

Розмір пор оболонки та їх структура впливає на швидкість проникнення води з ґрунту в оболонку, а потім і в ядро гранули. Завдяки наявності нанопор в оболонці та поверхні розділу, розчинення органо-мінерального добрива буде відбуватися від оболонки до серцевини, що є оптимальним способом поглинання добрив. У разі збільшення розміру пір вода з ґрунту буде проникати в гранулу в більшій кількості, викликаючи одночасне розчинення як оболонки, так і частково ядра гранули.

Крім того, при формуванні оболонки в тарілчастому грануляторі і подальшій термічній обробці гранули, через великий розмір пор можливе проникнення поживних речовин в ядро гранули.

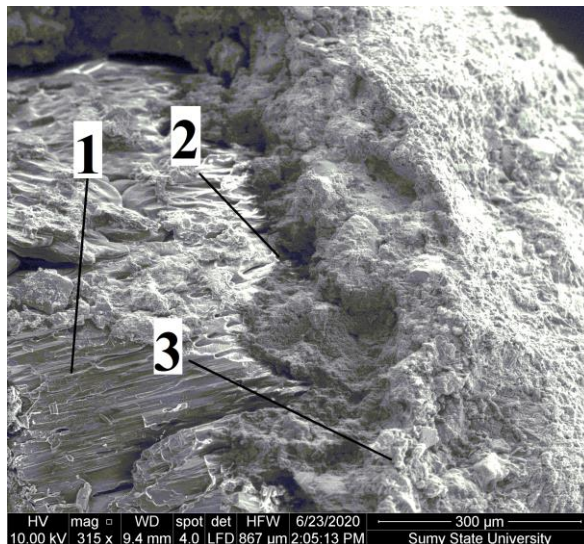


Рисунок 3.1 – Зразок органо-мінерального добрива:

1 – ядро гранули; 2 – інтерфейс; 3 – оболонка [37]

Досліджено морфологію зразка органо-мінеральних добрив та встановлено факт проникнення або непроникнення поживних речовин з оболонки в серцевину гранули. Процес інкапсуляції даного добрива здійснювався

нанесенням фосфатовмісної оболонки на основі фосфат-глауконітового концентрату на ядро гранули карбаміду та пластифікатора, що містить гумат кальцію з додаванням мікроелементів у вигляді хелатних сполук у кількості 0,0002–0,0005 % від маси гранули. Процес формування оболонки шляхом агломерації здійснювали в тарілчастому грануляторі при подачі гранул сечовини розміром 2-3 мм з наступним зволоженням їх розчином пластифікатора в кількості 10-14 % від маси фосфат-глауконітового концентрату, з одночасною подачею порошкоподібного фосфат-глауконітового концентрату до зволжених гранул. Фізико-хімічні дослідження морфології та елементного складу зразків добрив проводили методом скануючої електронної мікроскопії з EDX-аналізом для оцінки якості фосфатовмісної оболонки. Підтверджено наявність розгалуженої мережі нанопор в оболонці, що дозволить у майбутньому розробити механізми контролю процесу розчинення гранул у ґрунті. Під час аналізу були визначені наступні морфологічні ознаки:

- визначення форми нанопор;
- визначення глибини нанопор;
- визначення кількості нанопор і відносної площі нанопористої поверхні.

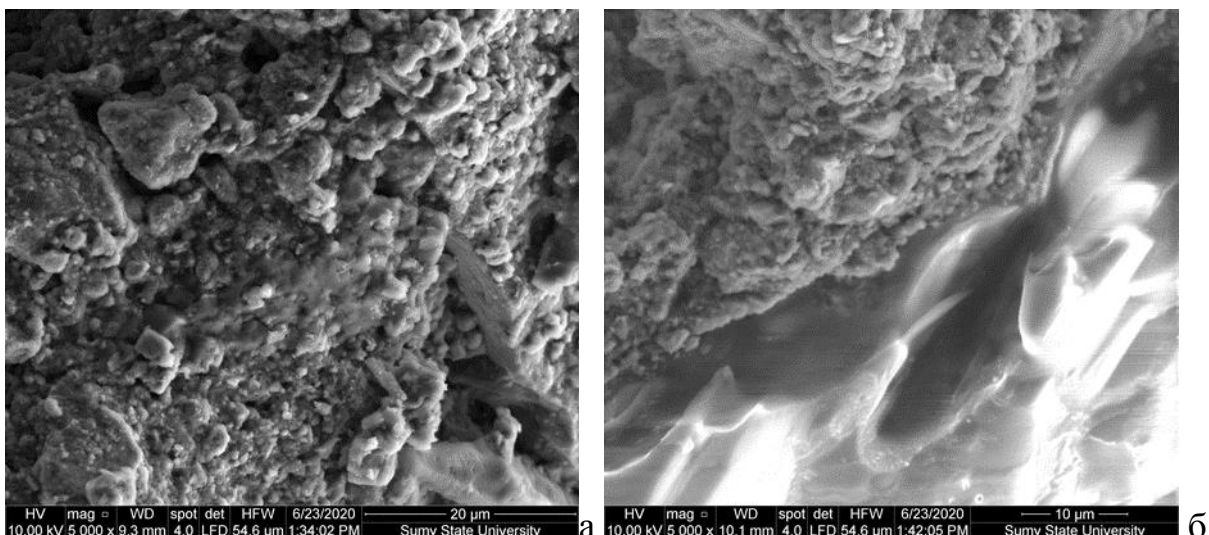


Рисунок 3.2 – Морфологія будови оболонки гранули:

(а) органо-мінерального добрива та структура інтерфейсу (б) [37]

SEM-морфологічний аналіз оболонки гранул дозволив зробити наступні висновки:

- нанопориста структура однорідна по всій поверхні оболонки і займає від 65 до 75% для різних зразків; товщина оболонки в різних частинах гранули нерівномірна, що вимагає додаткового вивчення та корекції технологічних параметрів процесу;

- морфологія пористої структури: прямолінійні та вигнуті нанопори, глибина яких коливається від 0,1 до 0,2 від товщини оболонки;

- пори створюють розвинену структуру по всій товщині оболонки, з'єднуючись між собою на різній глибині (товщині) оболонки;

- на поверхні оболонки є певна кількість «механічних» пор, які, ймовірно, утворилися під час висихання зразка;

- наявність таких пор призводить до необхідності перегляду термодинамічних характеристик процесу сушіння.

Аналіз морфології інтерфейсу гранул дозволив зробити наступні висновки:

- оболонка щільно прикріплена до ядра гранули;

- морфологія пористої структури, а саме прямолінійні нанопори та пори створюють розвинену структуру по всій межі розділу; однак нанопористої структури більше немає на поверхні ядра.

Аналіз елементного складу (рис. 3.3.) показує збільшення кількості С, N у правильному напрямку ядра гранули. Ядро гранули містить O, Al, Si, P, K, Ca, Fe, Mg, S, Na. Кількість O, Si, P, Mg, Na зросла на межі розділу ядра гранули та оболонки порівняно з кількістю елементів в оболонці. Кількість Al, K, Ca, Fe, S зменшується від верхньої частини поверхні до поверхні розділу. У внутрішньому шарі відсутні такі елементи, як Al, P, K, Fe, Mg, S, Na.

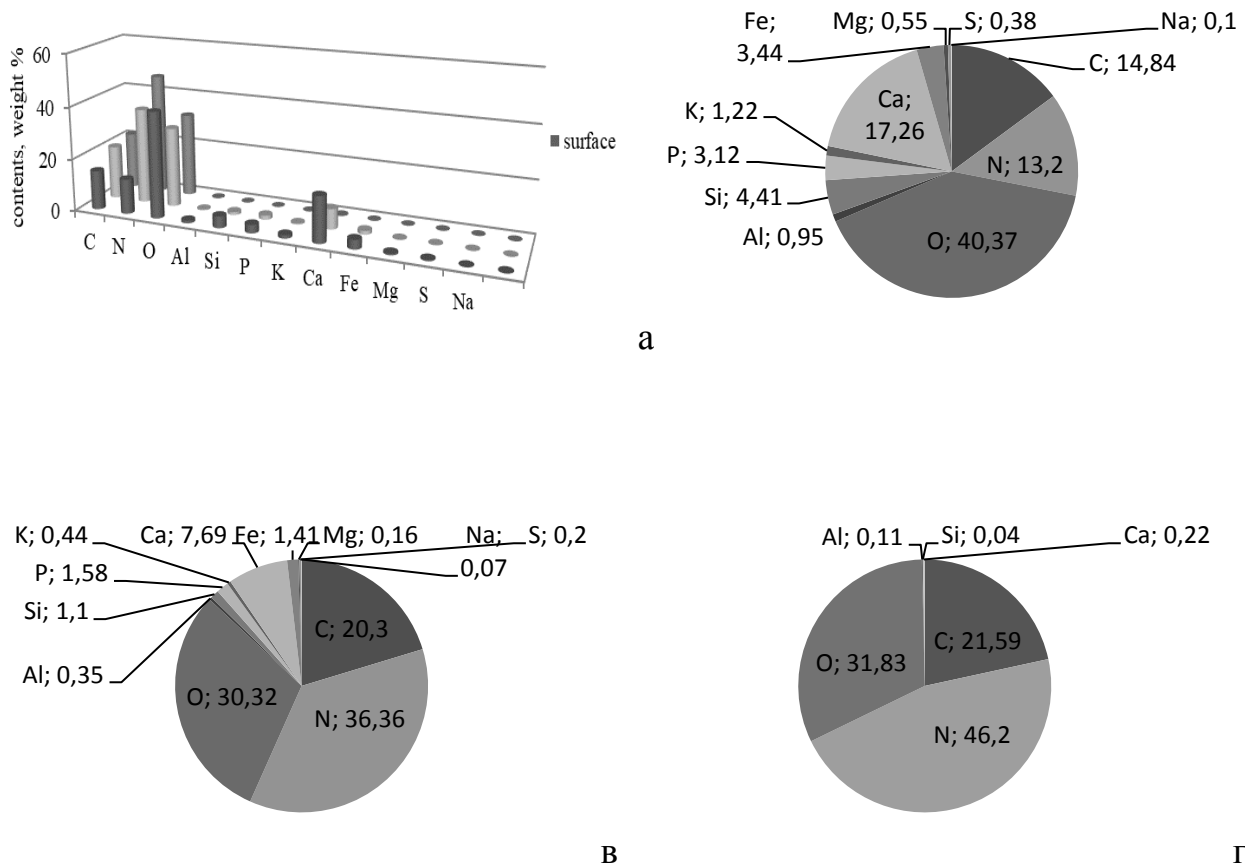


Рисунок 3.3 – Елементний склад гранул органо-мінерального добрива:

а – загальна характеристика зміни складу гранули від оболонки до серцевини; елементний склад: б – оболонки; в – інтерфейс; г – ядро [37]

З отриманих даних морфології можна зробити наступні висновки:

- створена розвинена нанопориста структура на поверхні органічної оболонки і по всій її товщині;
- основні поживні речовини оболонки практично не проникають всередину гранули;
- враховуючи різницю складу оболонки та гранули, засвоєння поживних речовин ґрунтом буде відбуватися рівномірно в заданому інтервалі часу, який визначається товщиною оболонки та діаметром ядра гранули;
- необхідно уточнити технологічні параметри процесу інкапсуляції та подальшого сушіння, щоб мінімізувати кількість «механічних» пор в оболонці (особливо на її поверхні) [37].

«Механічні» пори (пошкодження) разом з утвореною пористою структурою дозволяють волозі проникати всередину оболонки і розчиняти її в ґрунті. Однак значні пошкодження можуть призвести до відшаровування оболонки від серцевини гранули під час транспортування, а також до передчасного розчинення оболонки в ґрунті через велику кількість вологи, яка потрапляє в оболонку. Додаткове руйнування оболонки може бути викликано нещільним приляганням оболонки до серцевини гранули.

Рівномірність товщини оболонки гранул не є визначальним фактором, що впливає на якість добрива. На кожену гранулу за технологічним розрахунком наносять необхідну кількість концентрату. Основними показниками якості є:

- міцність гранул і оболонок;
- щільність оболонки до гранули та зчеплення оболонки з поверхнею гранули;
- розвинена пориста структура з мінімальною кількістю механічних пошкоджень поверхні, викликаних термічними навантаженнями під час висихання [37].

Використання гумату кальцію та мікроелементів у хелатному вигляді для виробництва капсульованого добрива у запропонованому технічному рішенні дозволило отримати добриво НРК, яке має міцність гранул не менше 1,7 МПа та вихід товарної фракції до 90 %. Це дає змогу підвищити коефіцієнт засвоюваності азотних, фосфорних та калійних компонентів добрива, значно зменшити негативний вплив добрив на навколишнє середовище та покращити якість рослинної продукції. Крім того, внесення до складу покриття інкапсульованого орґано-мінерального добрива гумату кальцію підвищує родючість і зберігає гумус ґрунту. Хімічний аналіз отриманого комплексного орґано-мінерального добрива такий: азот - 23,1%;  $P_2O_5$  - 7,25%,  $K_2O$  - 0,3%. Статична міцність 2,1 МПа.

Загальний вигляд отриманого капсульованого орґано-мінерального добрива та результати мікроскопії отриманих гранул наведені на рис. 3.4.



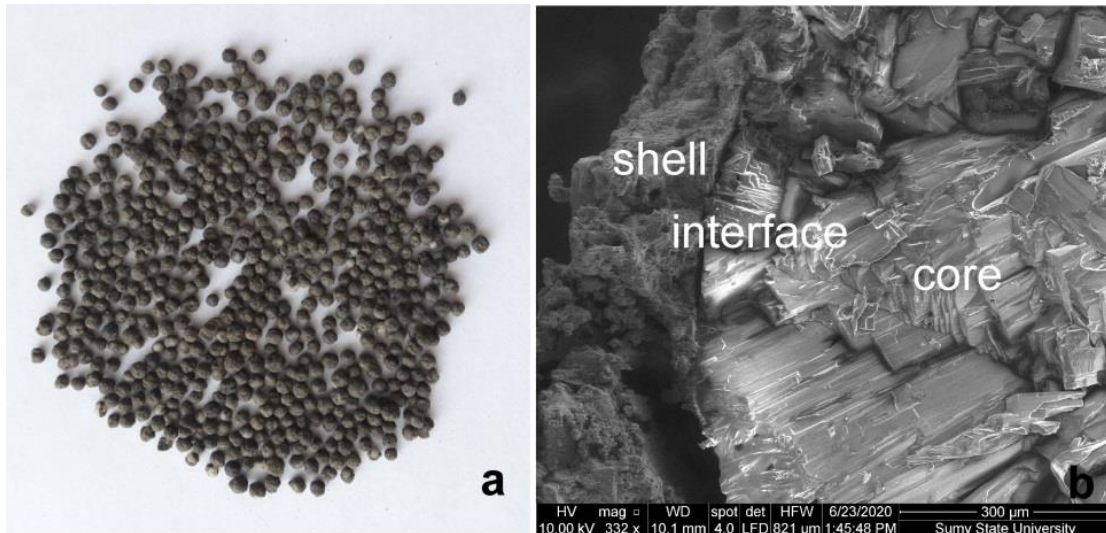


Рисунок 3.4 – Загальний вигляд капсульованого органо-мінерального добрива (а) та мікроскопія передвиробничої моделі капсульованого добрива (б) [38]

Результати мікроскопії отриманих гранул передвиробничої моделі капсульованого добрива (рис. 3.4 б) дозволили зробити наступні висновки:

- оболонка має однорідну структуру без механічних пошкоджень;
- спостерігається рівномірний розподіл оболонки на поверхні серцевини;
- оболонка надійно прикріплена до серцевини гранули.

Одержання комплексного N-P добрива за технологією напівсушіння шляхом осадження фосфоритного порошку на N-вмісне добриво в порівнянні з традиційним кислотним способом отримання N-P добрив дозволяє знизити вологість суспензії добрив з 40–50 % до 10–12 %. Це зменшує використання охолоджуючої рідини для сушіння продукту на 70 % і виділення газу втричі. Додатковий економічний ефект від використання такого роду добрив досягається за рахунок зменшення втрат добрив у ґрунті [38].

Перспективним є додавання до зразків біочару. Його отримували з масиву деревини на розробленій модельній установці методом піролізу. Процес проводили при температурі 600 °C протягом 48 годин. Відпрацьовано методику визначення основних показників. Отриманий біочар містив: масову частку золи

- 4,46 %, масову частку летких речовин - 4,53 % і масову частку нелеткого вуглецю - 91,01 %, вміст азоту - 25,62 %, вміст фосфору – 8,9 %.

Дослідження кількісних та якісних характеристик мікропористої структури отриманого зразка біовугілля проводили методом скануючої мікроскопії з елементним мікроаналізом. Результати дослідження представлені на рис. 3.5.

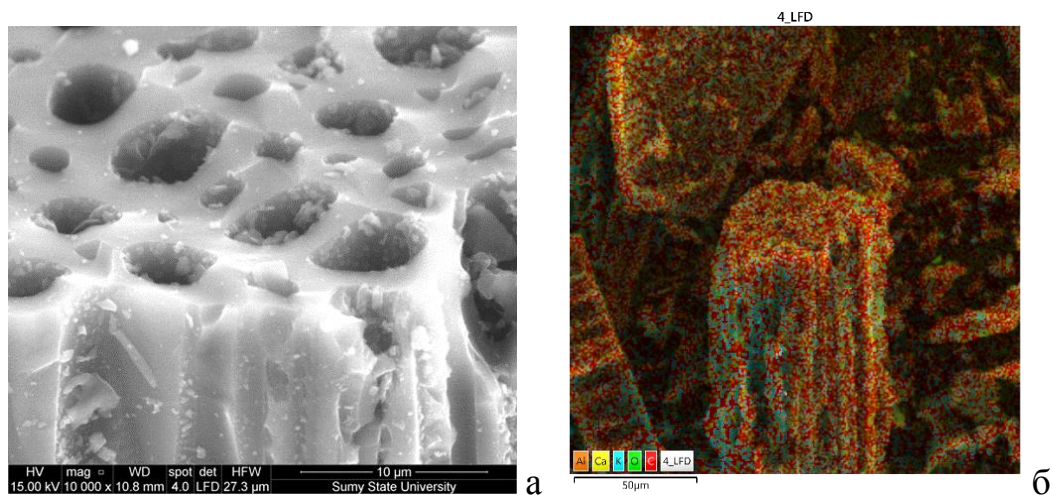


Рисунок 3.5 – Електронна фотографія мікроструктури біочару зі збільшенням  $\times 10\,000$  (а) Загальний вигляд капсульованого органо-мінерального добрива (а) та мікроструктури біочару зі збільшенням  $\times 1600$  (б) [39]

Аналіз морфології показав, що:

- структура біовугілля нанопориста комірчаста;
- пори – це прямолінійні канали, довжина яких фактично відповідає вертикальному лінійному розміру матеріалу;
- всередині клітин (каналів) є незначні включення біочару, площа поверхні якого дозволяє збільшити загальну поверхню масообміну.

Основні елементи по об'єму біочару розподілені рівномірно, що проілюстровано на рис. 3.5 (б).

Таким чином, введення біочару до фосфатовмісної оболонки створює додаткову нанопористу об'ємну структуру в органо-мінеральному добриві. Крім того, що внесення біочару в ґрунт підвищує його родючість та зменшує витрати

та викиди при виробництві й транспортуванні добрив, були проведені експериментальні дослідження для оптимізації кількості добавки, доданої до складу оболонки. Під час лабораторних досліджень по нанесенню фосфатовмісного покриття випробовувалися такі склади покриттів: фосфорит і 5% біочару; фосфориту і 10% біочару. Пластифікатор - гумат кальцію. Спосіб отримання капсульованих органо-мінеральних добрив та експериментальна установка для реалізації процесу описані в нашій роботі [39, 40].

За результатами дослідів для подальших досліджень прийнято композицію з 10% біовугілля. Хімічний аналіз отриманих гранул представлено в таблиці 3.1.

Таблиця 3.1 – Хімічний аналіз гранульованого карбаміду [40].

Назва показника та одиниця вимірювання	Результат вимірювання
1. Масова частка N, %	25,9
2. Масова частка P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> , %	8,1
3. Масова частка K <sub>2</sub> O, %	0,39
4. Масова концентрація води, %	0,15
5. Статична міцність, МПа	1,00

Отримані результати для оболонки з додаванням біочару потребували мікроскопічних досліджень для обґрунтування структури гранули та складу покриття, які безпосередньо впливають на швидкість дифузії азоту з гранули. Зображення SEM зовнішнього шару оболонки показано на рис. 3.6.

Дослідження морфології поверхні фосфатвмісної оболонки, показане на рис. 3.6 (а), показує, що:

- оболонка рівномірно покриває гранулу карбаміда;
- на поверхні оболонки є великі включення органічного матеріалу, що дає можливість отримати нанопористу поверхню, як показали результати аналізу біовугілля;

- поверхня оболонки має мережу звивистих нанопор, які бувають двох типів: «горизонтальні», розташовані безпосередньо на поверхні, і «вертикальні», що йдуть вглиб оболонки;
- оболонка міцна, не піддається руйнуванню при транспортуванні;
- на поверхні відсутні механічні дефекти (тріщини, порожнини, відколи тощо).

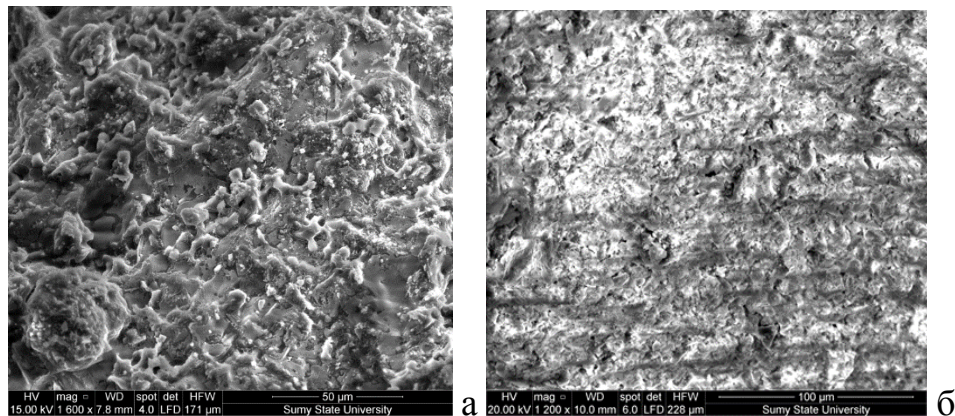


Рисунок 3.6 – SEM-зображення оболонки, що містить фосфат на поверхні, з роздільною здатністю  $\times 1600$  (а); та оболонки, що містить фосфат, всередині гранули з роздільною здатністю  $\times 1200$  (б) [40]

Таким чином, оболонка, завдяки наявності мережі звивистих нанопор, забезпечує:

1. Рівномірне проникнення вологи в оболонку для поступового розчинення.
2. Можливість проникнення вологи в серцевину після розчинення значної частини оболонки.

Додаткові дослідження структури оболонки від межі розділу ядра гранули показали, що нанопориста структура притаманна оболонці по всій її товщині і має рівномірний розподіл по об'єму та поверхні оболонки (рис. 3.6 (б)).



Розрахунок процесу розчинення оболонки та виділення поживних речовин можливий завдяки розробці технологічних параметрів отримання нанопористої структури та створенню механізмів керування процесом отримання нанопор.

Поверхня межі між фосфатовмісним органомінеральним покриттям і поверхнею карбаміду показана на рис. 3.7.

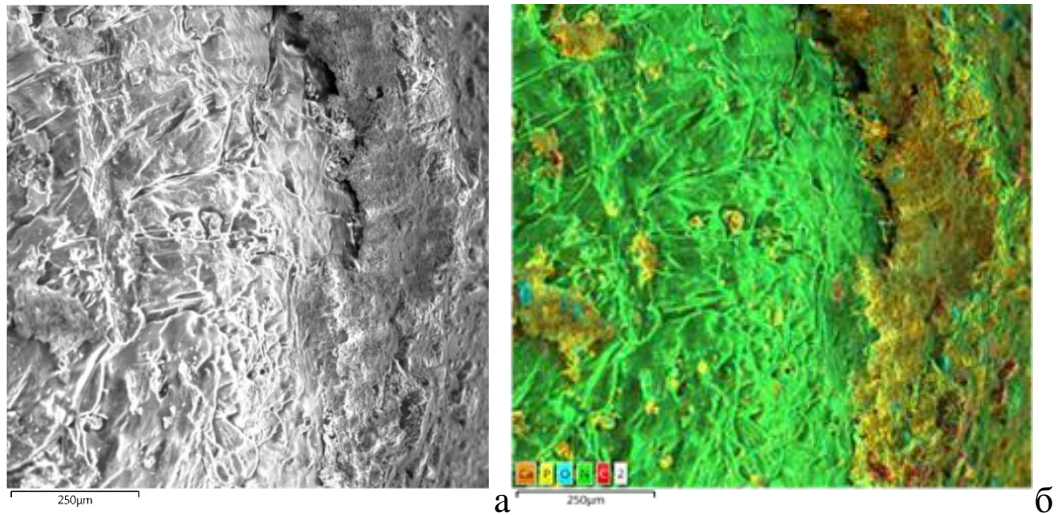


Рисунок 3.7 – SEM-зображення фосфатовмісного органо-мінерального покриття поверхні розділу сечовини при збільшенні  $\times 1600$  [39]

Дослідження структури інтерфейсу (рис. 3.7 (а) та 3.7 (б)) показує, що в добриві не спостерігалось дифузії азоту між серцевиною прілли та покриттям. Це свідчить про те, що фізико-механічні процеси переважають під час формування оболонки порівняно з хімічними. Таким чином, органічні компоненти фосфатовмісного покриття є бар'єром для розчинення азотного ядра прілли та утворюють нанопористі канали для проникнення вологи в гранулу.

У рамках дослідження було поставлено завдання вивчити структуру і розмір нанопор [40], які повинні вільно передавати воду (розмір молекули 0,28 нм) до органічної оболонки, а потім (після того, як оболонка розчиниться з заданою швидкістю) в ядро гранули мінерального добрива. Отримання даних про структуру нанопор визначає подальшу прикладну проблему досліджень в

нанорозмірних матеріалах для прогнозування швидкості розчинення органічної оболонки.

Процес інкапсуляції карбаміду був проведений наступним чином. Порошок фосфат-глауконітового концентрату подається на пріли карбаміду, попередньо змоченого гуматом калію або кальцію, в лоток гранулятора, при паралельному зволоженні пластифікатором. Для вивчення дифузійних властивостей оболонки в порошок фосфориту вводиться дозована кількість біочару. Співвідношення ваги покриття до ваги карбаміду зберігалось рівним 1. Процес гранулювання на пластинах був візуально контрольований. Вологість інкапсульованого карбаміду на виході з пластини гранулятора склала 6,42%. Вологі гранули сушать протягом 3 годин при 65 °С. Продукт було подрібнено для отримання комерційної фракції 2–5 мм. Хімічний склад зразку представлений в таблиці 3.2.

Таблиця 3.2 – Хімічний аналіз інкапсульованого карбаміду [40]

Назва показника та одиниця вимірювання	Результат вимірювання		
	Карбамід з фосфатною оболонкою і гуматом калію	Карбамід з фосфатною оболонкою і гуматом кальцію	Карбамід з фосфатною і біочарною оболонкою і гумат калію
1. Масова частка азоту, %	21,36	23,40	25,62
2. Масова частка фосфору в перерахунку на P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> , %	8,1	8,2	8,9
3. Масова частка калію в перерахунку на K <sub>2</sub> O, %	0,39	0,13	2,2
4. Масова частка води, %	0,79	0,45	0,15
5. Статична міцність, МПА	1,54	1,36	1,06

Завдяки додатковій підготовці гумату і більш рівномірному змоченню поверхні прілли під час її інкапсуляції, поверхня фосфатовмісного покриття мала більш щільну структуру і візуально відрізнялася від зразків попередніх партій.

Оцінка якості будови оболонки та інтерфейсу проводилася за наступними показниками:

- рівномірність покриття на поверхні ядра і рівномірність товщини покриття;
- однорідність нанопористої поверхні оболонки;
- наявність вигнутих пор для потенційного проникнення вологи ґрунту в оболонку;
- відсутність або невелика частка «механічних» пор, що виникають в результаті механічної дії на гранулу і/або температурних напруг в ядрі гранули;
- надійність і рівномірність кріплення оболонки до ядра гранули.

Морфологія зразків з додаванням біочару до складу оболонки представлена на рис. 3.8.

Вивчення морфології поверхні гранули показує, що фосфатне покриття рівномірне по поверхні без великих відмінностей в товщині ( $\pm 10$  від середнього значення). На поверхні практично відсутні грубі включення фосфат-глауконітового концентрату, але є включення органічного добрива, які надійно фіксуються в оболонці і не мають схильності до відколів при зовнішньому механічному впливі. Цей факт важливий для забезпечення транспортування гранул з місця виготовлення до місця внесення добрив у ґрунт. При цьому на поверхні гранули присутні звивисті нанопори, площа цієї поверхні становить 45-55 % від загальної поверхні гранул. Цього достатньо для успішного проникнення вологи в оболонку і її розчинення. На поверхні немає «механічних» пор, які можуть з'явитися через теплові навантаження при термічній обробці гранули.

Інтерфейс між фосфатовмісним покриттям і поверхнею прілли показаний на рис. 3.9. Стрілкою 1 позначено площу фосфатовмісного покриття, стрілка 2 позначає інтерфейс покриття і серцевину гранули, а стрілка 3 позначає ядро гранули.

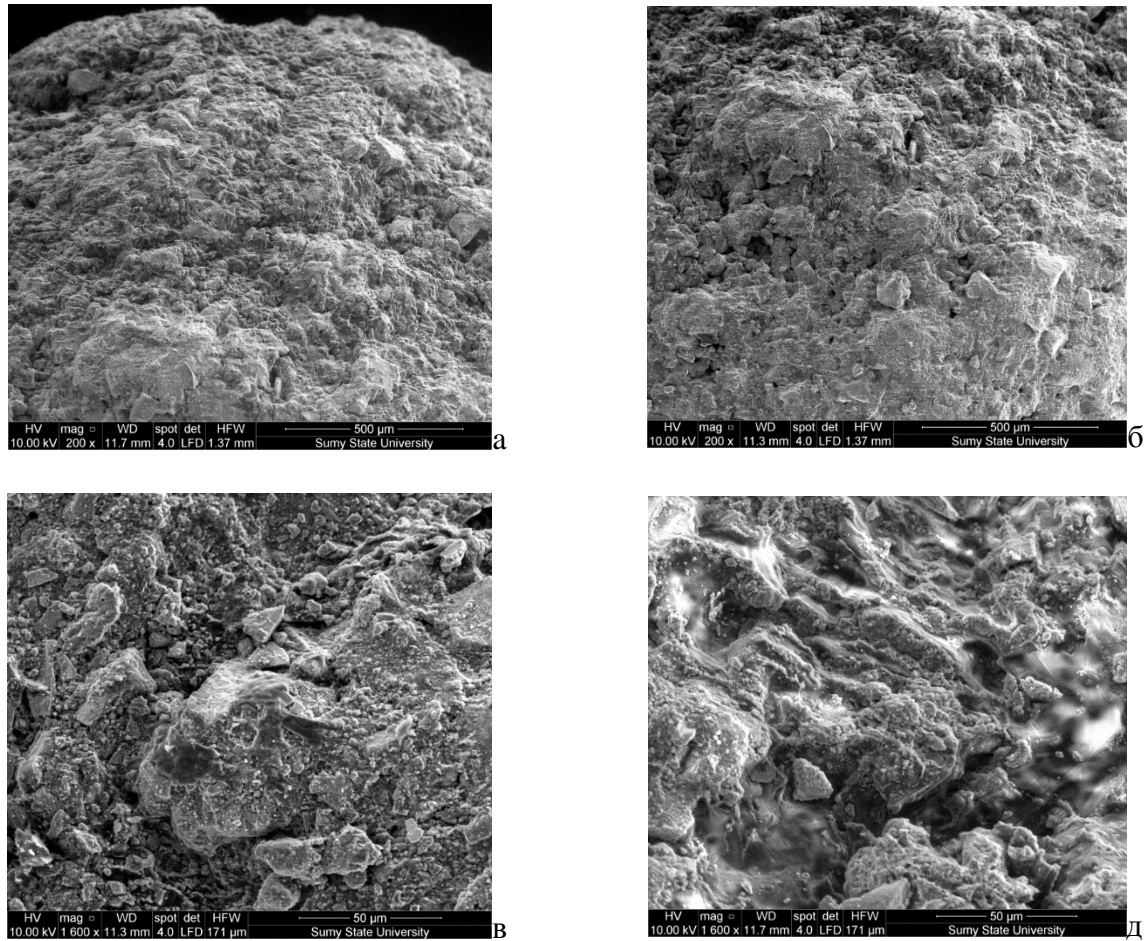


Рисунок 3.8 – SEM зображення поверхні: а – ступінь однорідності покриття;  
 б – непористі поверхневі елементи і «механічні» пори;  
 в – наявність поживних включень; г – звивисті пори [40]

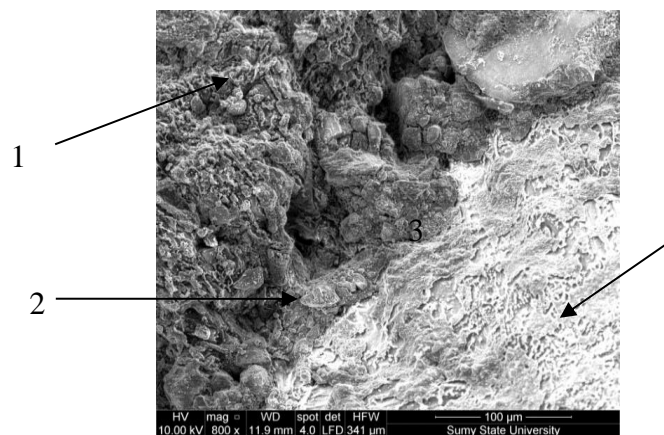


Рисунок 3.9 – SEM зображення гранули поперечного перерізу: 1 – фосфатна оболонка, 2 – інтерфейс між оболонкою і ядром, 3 – карбамідне ядро [40]



Як впливає з рис. 3.9., інтерфейс гранули (2) має певну товщину за рахунок взаємопроникнення розчиненої частини поверхні прілли і фосфатовмісної оболонки. Саме рівномірна товщина цієї зони забезпечує адгезію покриття і міцність самої гранули, а також дифузії властивостей покриття.

Основним бар'єром, що характеризує пролонгуючу дію інкапсульованої гранули, є фосфатовмісне покриття. Таким чином, вивчення його структури і якості адгезії до поверхні прілли є особливо актуальним. Структура оболонки при збільшенні  $\times 200$ ,  $\times 1600$  та інтерфейс контакту оболонки з поверхнею прілли при збільшенні  $\times 800$  показані на рис. 3.10. Дослідження морфології дозволяє зробити висновок, що існує рівномірна нанопориста структура по всій товщині оболонки. Мережа звивистих нанопор може забезпечити проникнення вологи по всій її товщині. Наявність фосфатних частинок в оболонці створює необхідний каркас і забезпечує її міцність, що ілюструється більш високою статичною міцністю інкапсульованої гранули в порівнянні з карбамідною пріллою. Рис. 3.10 (с) ілюструє досить однорідну структуру інтерфейсу між фосфатною оболонкою і ядром гранули при практично повній відсутності пор за рахунок взаємопроникнення розчиненої частини поверхні прілли і частинок фосфатно-глауконітового концентрату і гумату калію. Така структура забезпечує поступове проникнення вологи ґрунту в ядро гранул і дозволяє забезпечити послідовний механізм розчинення. Відсутність дефектів в цій частині гранули забезпечує надійну адгезію оболонки до поверхні прілли.

Вивчення розподілу хімічних елементів по об'єму гранули в інтерфейсі покриття, перехідній зоні і ядрі гранули (рис. 3.11) показує, що збільшення розчинення поверхні гранули дозволяє азотному компоненту мігрувати в глибину покриття. За межами інтерфейсу, формування покриття відбувається в основному механізмом агломерації фосфат-глауконітового концентрату за допомогою пластифікатора.

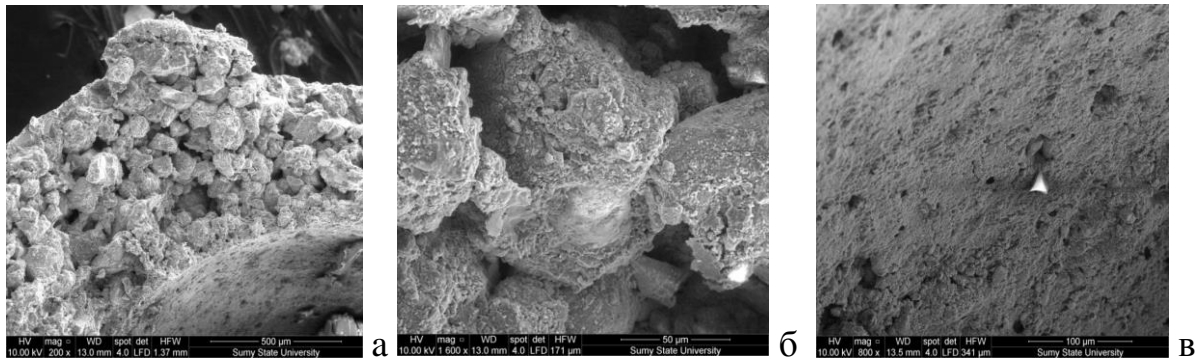


Рисунок 3.10 – SEM зображення гранул карбаміду з фосфатним покриттям з додаванням біочару: а – зріз покриття; б – фосфатна оболонка,  $\times 1600$ ; в – інтерфейс,  $\times 800$  [40]

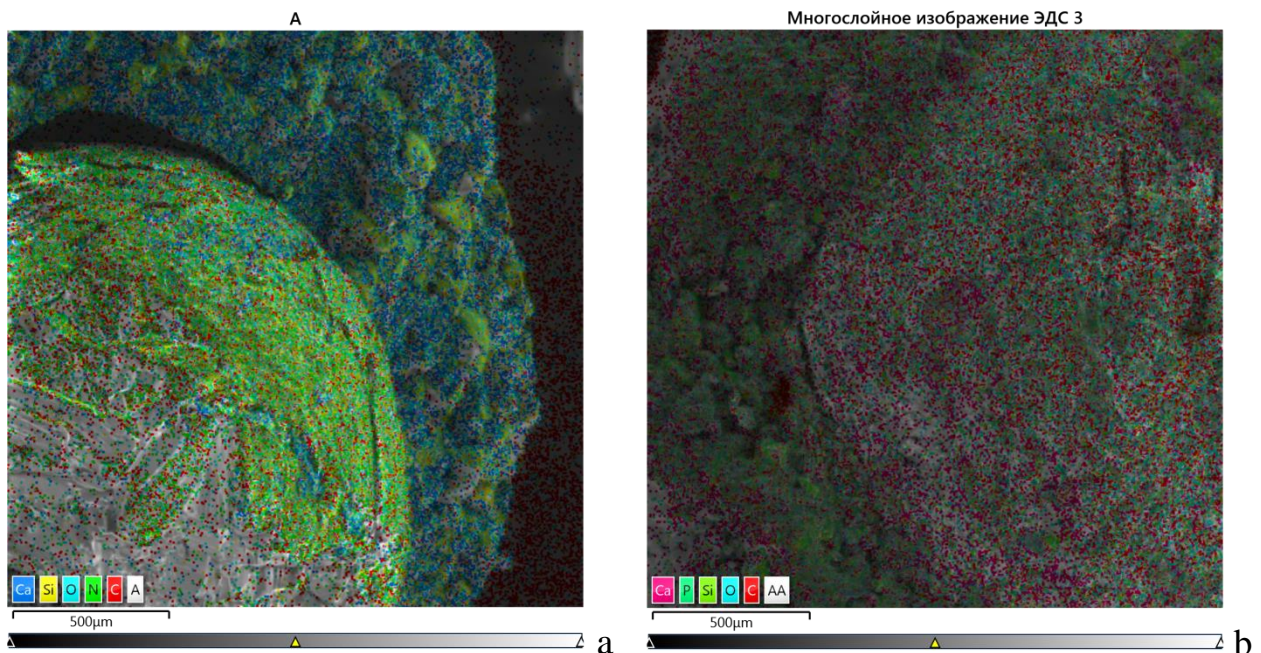


Рисунок 3.11 – SEM зображення наночастинок, з розподілом елементів: а - зріз гранули; б - інтерфейс гранули з елементами покриття на ядрі [40]

Проведені дослідження з модернізації технології інкапсуляції гранул [41] карбаміду фосфат-глауконітом з використанням пластифікаторів – гуматів калію і кальцію, з додаванням біочару дозволили отримати зразки органо-мінеральних добрив з тривалою дією з поліпшеними фізико-хімічними характеристиками.

## **Висновки**

1. Запропонована технологія формування капсульованих добрив дозволяє отримати рівномірну нанопористу структуру на поверхні і в глибині оболонки.
2. Покращення фізико-хімічних властивостей досягається шляхом досягнення однорідного інтерфейсу між оболонкою і ядром гранули.
3. Мережа глибоких звивистих нанопор дозволяє проникнення вологи ґрунту в гранулу і послідовно розчиняє спочатку органічну частину оболонки, а потім азотне ядро гранули.

## 4 КОМП'ЮТЕРНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ РОЗЧИНЕННЯ КАПСУЛЬОВАНИХ ГРАНУЛ, ГІДРОДИНАМІКИ ТА ТЕПЛО- МАСООБМІНУ В ОКАТУВАЛЬНИХ АПАРАТАХ

### 4.1 Опис комп'ютерної програми розрахунку конструктивних параметрів тарілчастого гранулятора

#### **Постановка задачі:**

Реалізувати програми для розрахунку конструктивних параметрів тарілчастого гранулятора(надалі програма). Умовами передбачено набір вхідних даних. Програма виконує перевірку коректності вхідних даних, повідомляє про помилки вводу та виконує необхідні обчислення з виводом результатів.

#### **Використані технології:**

- HTML – мова тегів, якою пишуться гіпертекстові документи для мережі Інтернет.
- CSS – спеціальна мова стилю сторінок, що використовується для опису їхнього зовнішнього вигляду.
- JS – динамічна, об'єктно-орієнтована прототипна мова програмування.
- jQuery – JavaScript-бібліотека з відкритим кодом розроблена, щоб зробити орієнтування у навігації зручнішим завдяки вибору елементів DOM, створенню анімації, обробки подій, і розробки AJAX-застосунків.

#### **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 виконанні, 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.

### **Використання програми:**

Відкрити файл index.html у веб-браузері. Поля вхідних даних заповнені коректними даними, кнопка RUN ініціює виконання програми. Результат з'являється нижче, у блоці Result. Вхідні дані можна змінювати та перевіряти результат знову. Перезавантаження сторінки поверне початкові «дефолтні» значення.

Алгоритм роботи програми наступний.

Вихідні дані:

$Q_{dr}$  - продуктивність тарілчастого гранулятора по сухому продукту, кг/год.

$Q_{dr} = 50-5000$  кг/год.

$k_1$  - вологість шихти, масові частки

$k_1 = 0,08-0,14$

$R_{s.a}$  - витрата ретура, кг/год

При введенні цього параметра для користувача має відобразитися підказка: « $R_{s.a}$  приймається в діапазоні від  $0,2 Q_{dr}$  до  $Q_{dr}$ ». Якщо користувач вводить значення, яке не входить у заданий діапазон, то має з'явитись попередження з текстом: «Введіть значення  $R_{s.a}$  в діапазоні від  $0,2 Q_{dr}$  до  $Q_{dr}$ ».

$t_{pr}$  - температура процесу, °C;  $t_{pr} = 10-70$  °C.

A и B – константи, що залежать від виду гранульованого матеріалу;

A = 1,56; B = - 0,0023.

$\varphi_m$  - кут природного укосу гранульованого матеріалу, град;

$\varphi_m = 0-90$  град.

$\alpha$  - кут нахилу тарілі, град;  $\alpha = 0-90$  град.

При введенні вихідних даних для користувача повинна впливати підказка: «Умова роботи гранулятора:  $\varphi_m < \alpha$ ». Якщо користувач вводив значення  $\varphi_m \geq \alpha$ , то має з'являтися вікно: «Не виконано умову»  $\varphi_m < \alpha$ ».

$\varepsilon$  - ступінь заповнення тарелі, м<sup>3</sup>/м<sup>3</sup>;  $\varepsilon = 0,15-0,4$ .

$k_3$  - коефіцієнт уточнення робочого числа обертів тарілі;  $k_3 = 0,6-0,9$ .

$\gamma_{gr}$  - насипна вага грануляту, Н/м<sup>3</sup>;  $\gamma_{gr} = 5000-20000$  Н/м<sup>3</sup>

### Алгоритм розрахунку

Продуктивність по готовому продукту, кг/год:

$$Q = Q_{dr} \cdot (1 + k_1), \quad (4.1)$$

Кратність ретура:

$$y = \frac{R_{s.a.}}{Q}, \quad (4.2)$$

Об'єм шару шихти на тарії гранулятора, м<sup>3</sup>

$$V = (y + 1) \cdot Q \cdot (j + 1), \quad (4.3)$$

де поправний температурний коефіцієнт

$$j = \frac{1}{A + B \cdot t_{pr}}, \quad (4.4)$$

Діаметр тарілі, м

$$D = \sqrt[3]{\frac{V}{0,025}}, \quad (4.5)$$

Коефіцієнт пропорційності, що залежить від ступеня заповнення тарілі матеріалом

$$k_2 = \frac{6\pi \cdot (1 - \varepsilon)}{3\pi - 4}, \quad (4.6)$$

Висота тарілі, м

$$H = \frac{D}{k_2} [\operatorname{tg}(\alpha - \varphi_m)] \quad (4.7)$$

Критичне число обертів тарілі гранулятора, об/с

$$n_{cr} = \frac{42,3}{\sqrt{D}} \sqrt{\frac{\sin(\alpha - \varphi_m)}{\cos \alpha}}. \quad (4.8)$$

Робоче число обертів, об/с

$$n = k_3 n_{cr}. \quad (4.9)$$

Перевірка емпіричної умови

$$D \cdot n \leq 30 \quad (4.10)$$

Якщо умова (10) не дотримується, то користувачеві має з'явитись попередження з текстом: «Умова не виконується. Змініть значенн  $\varepsilon$ ».

Кутова швидкість тарілі, 1/с

$$\omega = \frac{\pi \cdot n}{30} \quad (4.11)$$

Перевірка працездатності гранулятора

$$\frac{\omega^2 \cdot D}{2g \cdot \sin \alpha} + \frac{2g}{\omega^2 \cdot D} \left( \sin \alpha - \varphi_m^2 \frac{\cos^2 \alpha}{\sin \alpha} \right) = 1,9 - 2,1. \quad (4.12)$$

При підстановці всіх даних у формулу (10) отримане значення у лівій частині формули має дорівнювати 1,9-2,1. Якщо ця рівність не виконується, то



користувачеві має з'являтися вікно: «Працездатність гранулятора не забезпечена, змініть значення  $\alpha$ ».

Коли умова виконається, то екрані програми має з'явитися значення  $\alpha$ , у якому виконується ця умова:

$$\alpha_a = \text{град}$$

Потужність приводу тарілчастого гранулятора, Вт

$$N = 8 \cdot 10^{-6} D^2 \cdot n \cdot \sin \alpha \cdot \gamma_{gr}. \quad (4.13)$$

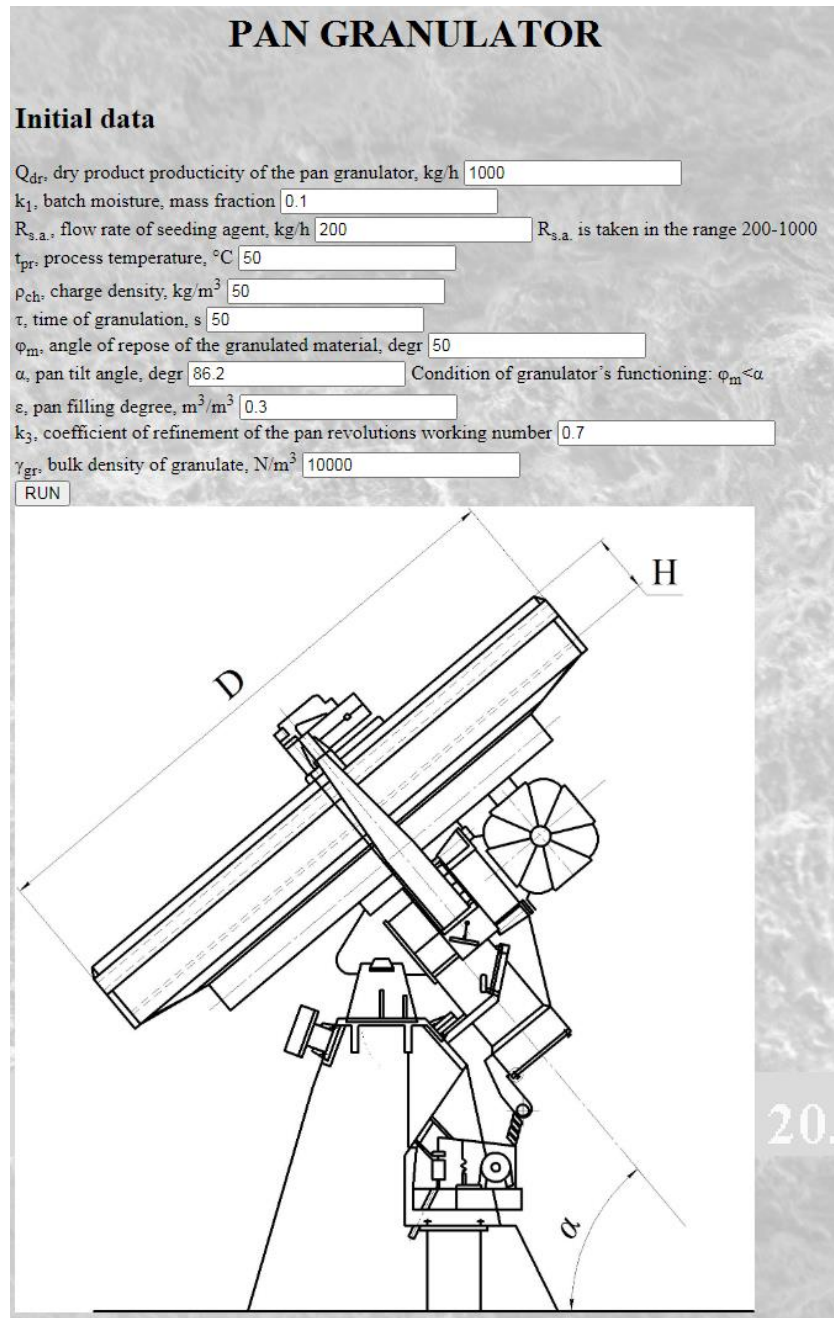


Рисунок 4.1 – Програма Pan Granulator: вихідні дані і конструювання тарілчастого гранулятора

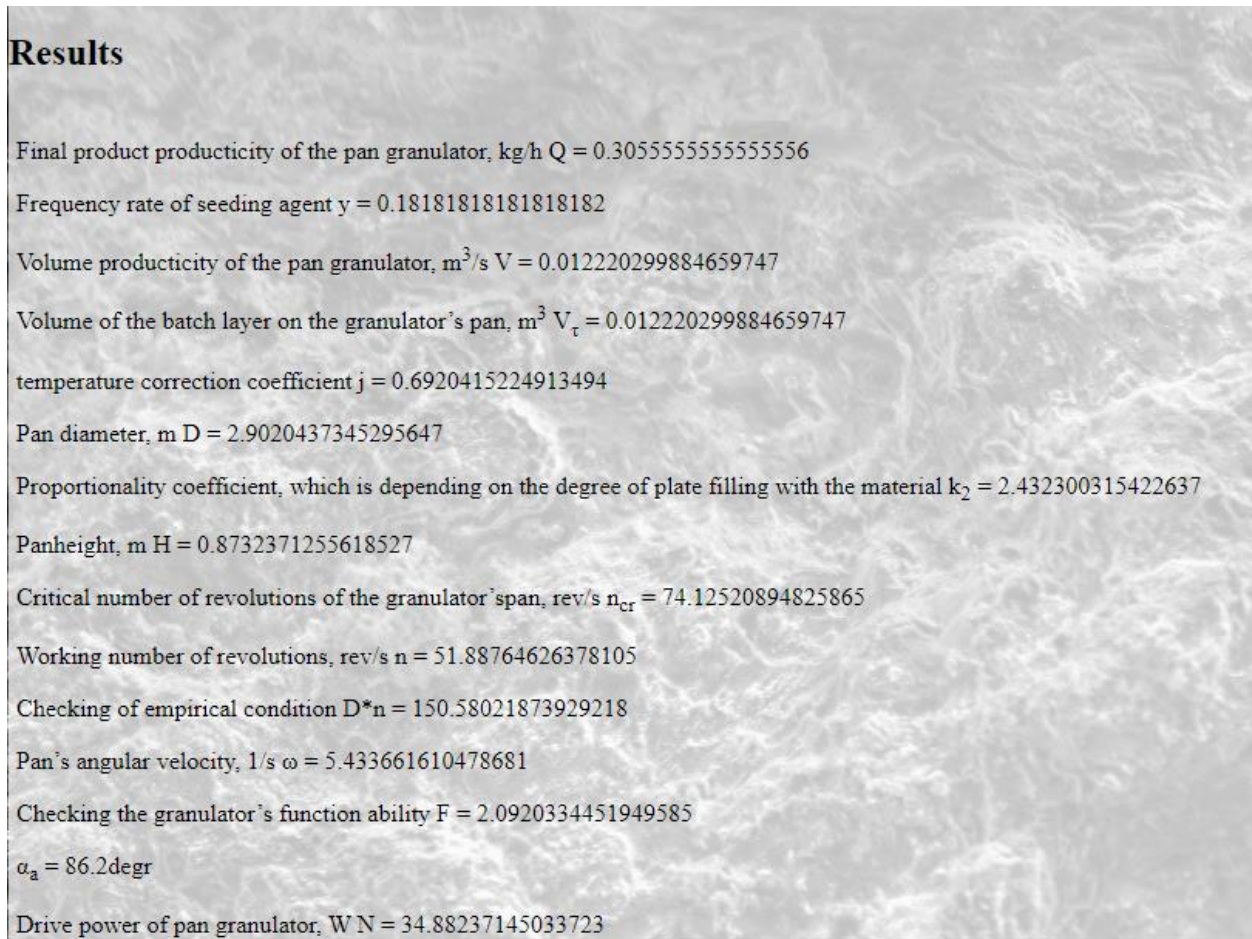


Рисунок 4.2 – Програма Pan Granulator: результати

#### 4.2. Експериментальні дослідження з розчинення органо-мінеральних добрив пролонгованої дії

Визначення розчинності і вимивання різних видів капсульованих добрив проводили на установці та за методикою, розробленою раніше [30]. Схема установки наведена на рис. 4.3.

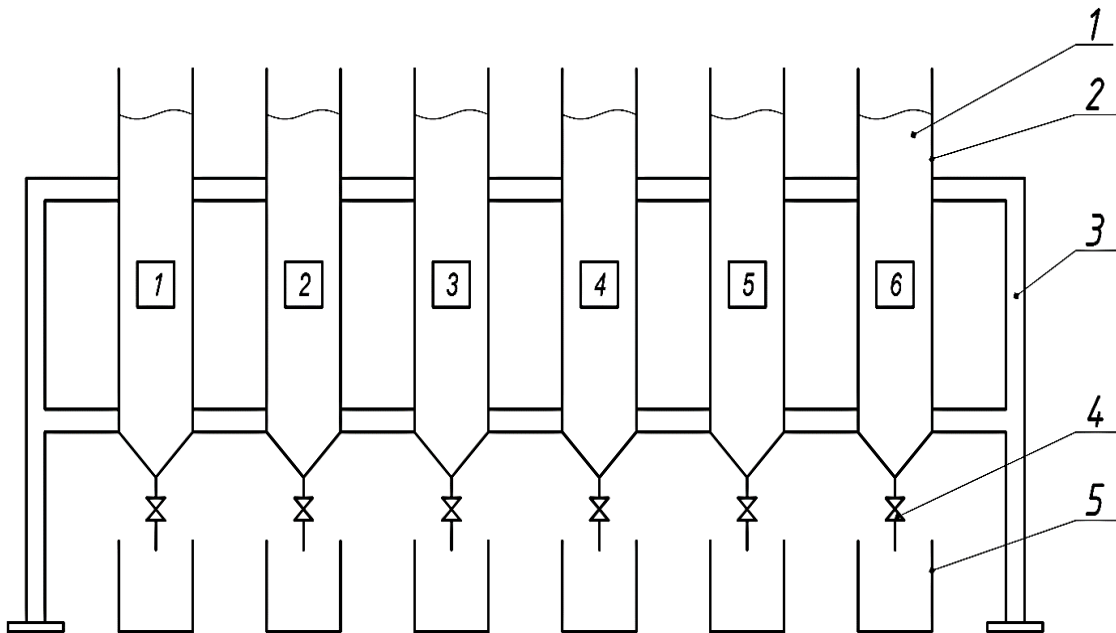


Рисунок 4.3 – Схема лабораторної установки для дослідження процесу вимивання поживних речовин із капсульованих добрив:

1 – ґрунт; 2 – ґрунтова колонка; 3 – рамка; 4 – кран;

5 – ємність для збору промивних вод

#### Схема досліду.

В колонках використовувались наступні види добрив:

1 колонка – контроль – без добрив;

2 колонка – гранульований карбамід;

3 колонка – карбамід, покритий фосфоритом, пластифікатор гумат калію;

4 колонка – карбамід, покритий фосфоритом, пластифікатор гумат кальцію;

5 колонка – карбамід, покритий сумішшю фосфориту та біочару, пластифікатор гумат кальцію;

#### Розрахунок дози внесених добрив.

Добрива розраховані за азотом у перерахунку на діючу речовину і взяті у подвійній дозі, тобто замість  $N_{60}$  взято  $N_{120}$ .

Вага ґрунту пахотного шару 1 га (0-20 см) – 3200 т/га або 3200000 кг

1,1 кг – вага ґрунту 0-20 см в колонці

**Варіант 1** (1 колонка). Контроль – без добрив.

**Варіант 2** (2 колонка). Традиційні добрива – карбамід, 46,2 % -  $N_{60}$ .

Діючої речовини в карбаміді 46,2 %, тобто в 100 кг карбаміду азоту 46,2 кг.

Це значить, що коефіцієнт дорівнює  $100:46,2=2,2$ .

Фізиччна маса добрива дорівнює  $N_{60} \times \text{коэф.} = 60 \times 2,2 = 132 \text{ кг}$  карбаміду.

3200 т або 3200000 кг на 1 га – 132 кг карбаміду,

на 1,1 кг –  $x$

$$x=1,1 \times 132 / 3200000 = 45,4 \text{ мг} - N_{60}$$

$N_{120} - 45,4 \times 2 = 90,8 = 91 \text{ мг}$  карбаміду – на посудину.

**Варіант 3** (3 колонка). Карбамід, покритий фосфоритом, пластифікатор гумат калію, 21,36 % -  $N_{60}$ . Коефіцієнт  $100:21,36=4,68$ .

Фізиччна маса добрива дорівнює  $N_{60} \times \text{коэф.} = 60 \times 4,68 = 280,9 \text{ кг}$

Розраховуємо аналогічно:

на 1 га – 280,9 кг

(3200 т)

на 1,1 кг –  $x$

$$x=1,1 \times 280,9 / 3200000 = 96,6 \text{ мг} - N_{60}$$

$N_{120} - 96,6 \times 2 = 193 = \text{мг}$  добрива – на посудина.

**Варіант 4** (4 колонка). Карбамід, покритий фосфоритом, пластифікатор гумат кальцію, 23,4 % -  $N_{60}$ . Коефіцієнт  $100:23,4=4,27$ . Фізиччна маса добрива дорівнює  $N_{60} \times \text{коэф.} = 60 \times 4,27 = 256,4 \text{ кг}$

Розраховуємо аналогічно:

на 1 га – 256,4 кг

(3200 т)

на 1,1 кг –  $x$

$$x=1,1 \times 256,4 / 3200000 = 88,1 \text{ мг} - N_{60}$$

$N_{120} - 88,1 \times 2 = 176,28 = \text{мг}$  добрива – на посудину.

**Варіант 5** (5 колонка). Карбамід, покритий фосфоритом і біочаром, пластифікатор гумат кальцію, 25,62 % -  $N_{60}$ . Кофіцієнт  $100:25,62=3,9$ . Фізична маса добрива дорівнює  $N_{60} \times \text{коэф.} = 60 \times 3,9 = 234,2 \text{ кг}$

Рохраховуємо аналогічно:

на 1 га – 234,2 кг

(3200 т)

на 1,1 кг –  $x$

$x=1,1 \times 234,2 / 3200000 = 80,5 \text{ мг} - N_{60}$

$N_{120} - 96,6 \times 2 = 161 = \text{мг добрива} - \text{на посудину.}$

### **Проведення досліду.**

1. Колонки наповнені ґрунтом, просіяним через сито Ø 5 мм.
2. Для проведення досліду по промиванню ґрунту необхідно насичення ґрунту вологою. На зволоження ґрунту пішло 230 мл (в кожену колонку).
3. Для промивки (через 2 години після зволоження) беремо по 180 мл. Воду розраховуємо за кількістю місячних опадів. На Сумщині сума опадів за рік становить 430 мм/рік. Середньомісячна кількість опадів приблизно дорівнює ~36 мм/місяць. Виконано було 5 промивок. У ході проведення експерименту було виявлено, що достатньо провести 4 промивання через спотворення результатів 5 промивання і зведення її практично до одного показника для всіх зразків добрив.

Результати проведених експериментів представлені графіку (рис. 4.4).

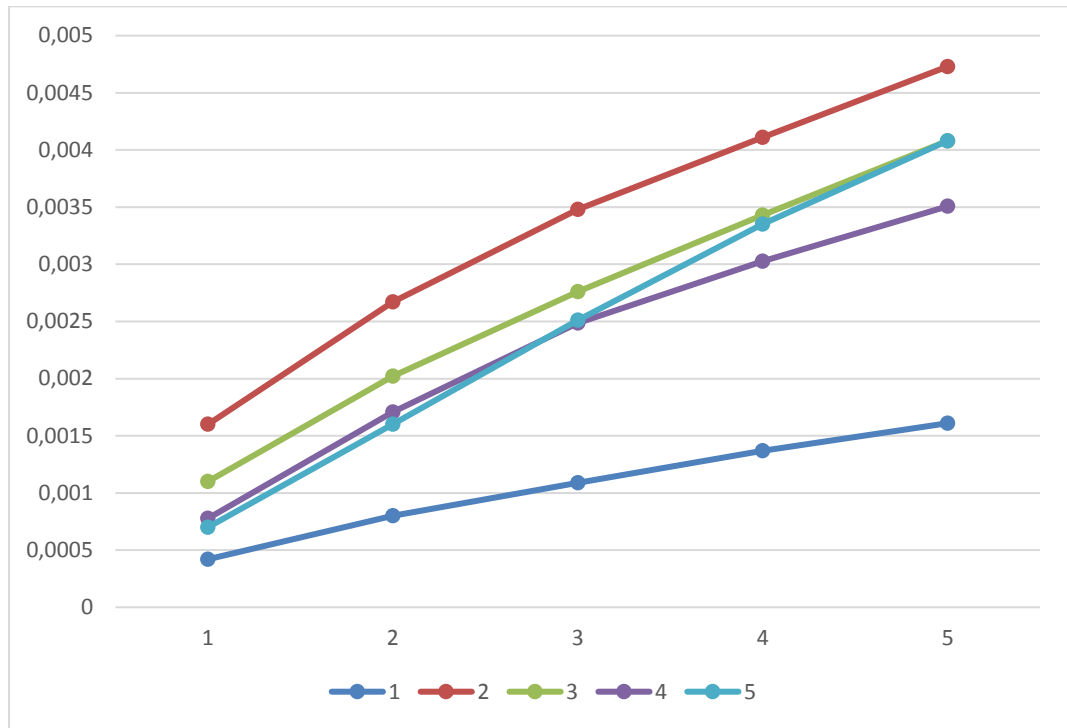


Рисунок 4.4 – Графік втрат азоту в залежності від кількості промивок

Аналіз даних представлених на рис. 4.4 показує, що тільки добриво з добавкою биочара має такий самий характер вимивання азоту з гранули як ґрунт без добрив. Отже, запропонований склад покриття на основі фосфориту та биочара з пластифікатором гуматом кальцію є найбільш перспективним видом органо-мінерального добрива пролонгуючої дії.

## **5 ПРОВЕДЕННЯ ДОСЛІДЖЕНЬ З ОЦІНКИ АГРОХІМІЧНОЇ, ЕКОЛОГІЧНОЇ ТА ЕКОНОМІЧНОЇ ЕФЕКТИВНОСТІ РОЗРОБЛЕНИХ СКЛАДНИХ ДОБРІВ ПРОЛОНГОВАНОЇ ДІЇ**

Розроблена рецептура капсульованого органо-мінерального добрива пролонгованої дії з додатковим введенням до складу фосфатовмісної оболонки біочару була апробована в ході вегетаційних досліджень. Введення в склад оболонки інгредієнтів з низьким вуглецевим слідом потенційно дозволяє отримати складне добриво з підвищеним коефіцієнтом використання поживних речовин, яке буде більш екологічно безпечнішим.

### **5.1 Визначення агрохімічної ефективності капсульованих органо-мінеральних добрив пролонгованої дії**

За розробленою методикою були проведені попередні вегетаційні дослідження з вирощування ячменю із застосуванням капсульованих органо-мінеральних добрив, у порівнянні з внесенням традиційних добрив, які показали перспективність такого напрямку робіт. У ході експерименту досліджувались наступні зразки ґрунту: 1 – контроль без добрив; 2 – сечовина; 3 – капсульована фосфатовмісною оболонкою сечовина з пластифікатором гуматом калію; 4 – капсульована фосфатовмісною оболонкою сечовина з пластифікатором гуматом кальцію; 5 – сечовина, капсульована фосфатовмісною оболонкою з 10 % біочару, з пластифікатором гуматом кальцію (рис. 5.1).

За результатами дослідження можна зробити попередній висновок про те, що при внесенні добрив трансформація вуглецю в органічну речовину підвищує якість та родючість ґрунту за рахунок утримання води та поживних речовин, що призводить до більшої продуктивності сільськогосподарського господарства. Так результати дослідження показали, що зелена маса зразків ячменю була вищою за контроль у зразку з сечовиною на 44 %, в капсульованому добриві зразка 3 на 42 %, в зразку 4 на 32 % і в зразку 5 більш ніж на 80 %, а також краща властивість



досліджуваного зразка 5 переносити посушливий період вегетації. Порівняльний аналіз зразків ґрунту дозволяє зробити попередні висновки що капсулювання азотних добрив фосфатовмісною оболонкою дозволяє не знижувати рН ґрунту (рис. 5.2), що потенційно зменшує рухомість важких металів в орному шарі.



Рисунок 5.1 – Загальний вигляд вегетаційного досліджу

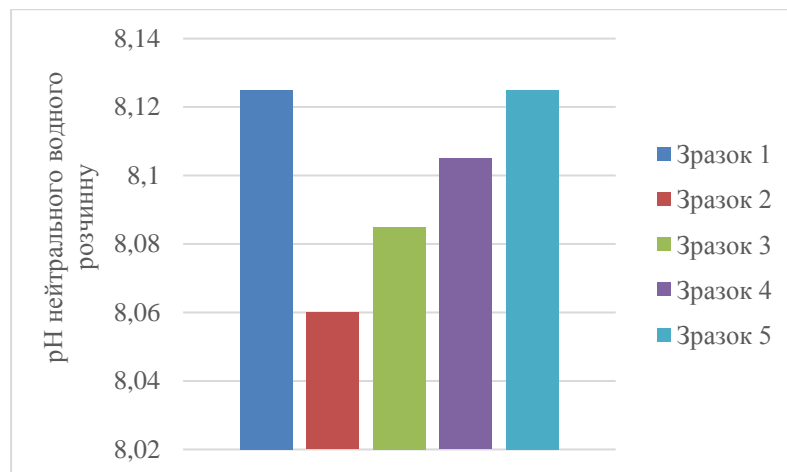


Рисунок 5.2 – Показник активності водневих іонів водного розчину ґрунту

В дослідях з капсульованими зразками добрив одночасно відмічене накопичення вмісту гумусу на 4–20 % у ґрунті (рис. 5.3).

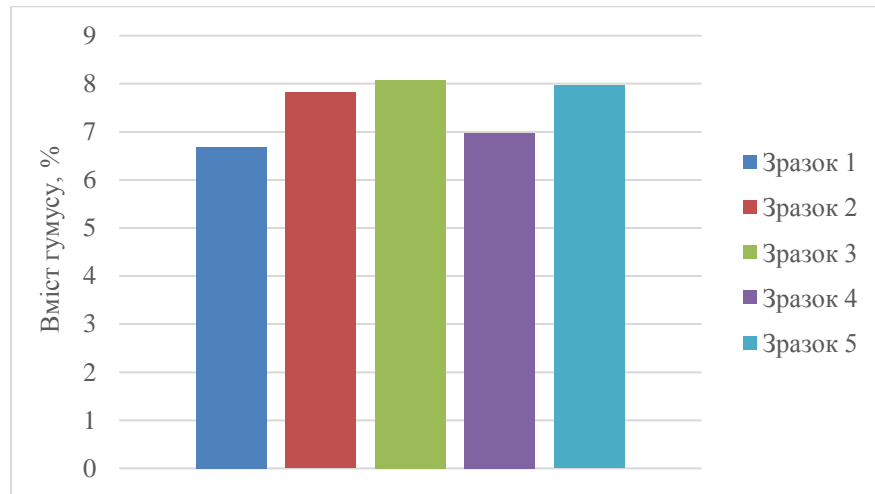


Рисунок 5.3 – Вміст гумусу у ґрунті

Отже, проведені порівняльні дослідження різного складу фосфатовмісної оболонки капсульованих органо-мінеральних добрив пролонгованої дії підтвердили їх агрохімічну ефективність і перспективність подальшого застосування з огляду на екологічну безпечність. Введення до складу добрив наступних компонентів: фосфоритового борошна, гуматів калію та кальцію, біочару, дозволяє отримати в цілому добриво з низьким вуглецевим слідом. А напівсухий спосіб одержання такого добрива дає можливість знизити вологість продукту на стадії гранулювання майже в чотири рази, що веде до зниження вуглецевого сліду технології їх виробництва. Додатковим ефектом є можливість ідентифікувати даний клас добрив, як добриво для органічного землеробства.

Методом атомно-емісійної спектроскопії в зразках рослин ячменю визначений вміст азоту, фосфору і калію. Результати аналізу наведені на рис. 5.4, 5.5 та 5.6.

Таблиця 5.1 – Приріст урожаю при використанні розроблених видів добрив

Номер зразка	1	2	3	4	5
Вид добрива	Без добрив	Карбамід	Капсульований фосфатовмісною оболонкою карбамід з пластифікатором гуматом калію	Капсульований фосфатовмісною оболонкою карбамід з пластифікатором гуматом кальцію	Карбамід, капсульований фосфатовмісною оболонкою з 10 % біочару, з пластифікатором гуматом кальцію
Приріст врожаю, %	-	44,33	42,53	32,78	80,41

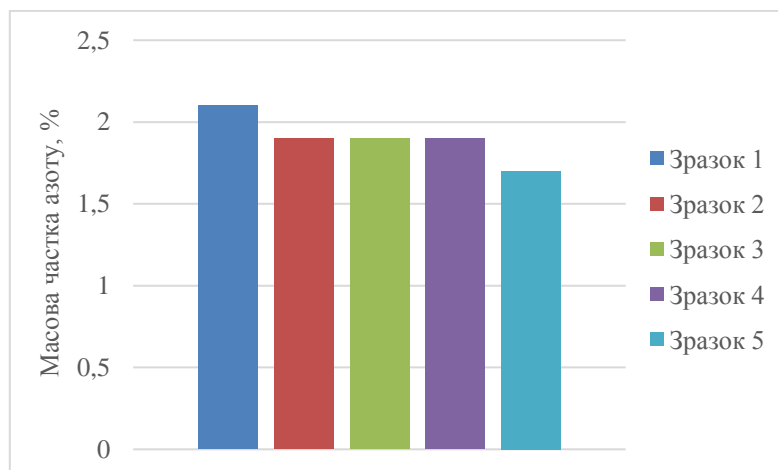


Рисунок 5.4 – Вміст азоту у зразках добрив

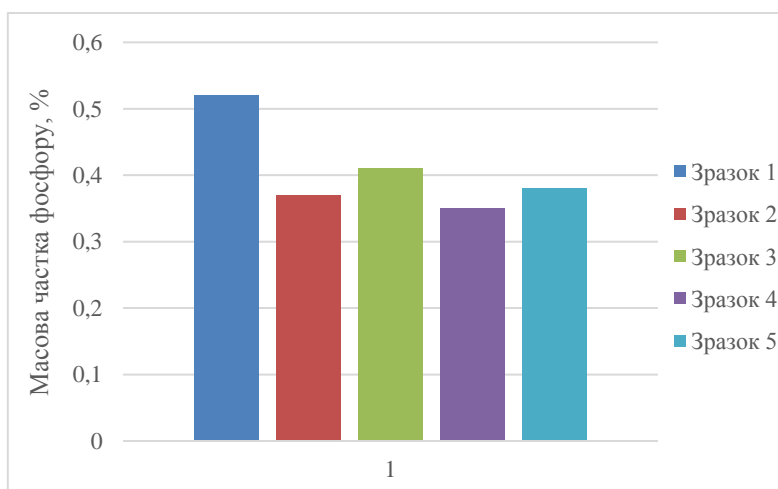


Рисунок 5.5 – Вміст фосфору у зразках добрив

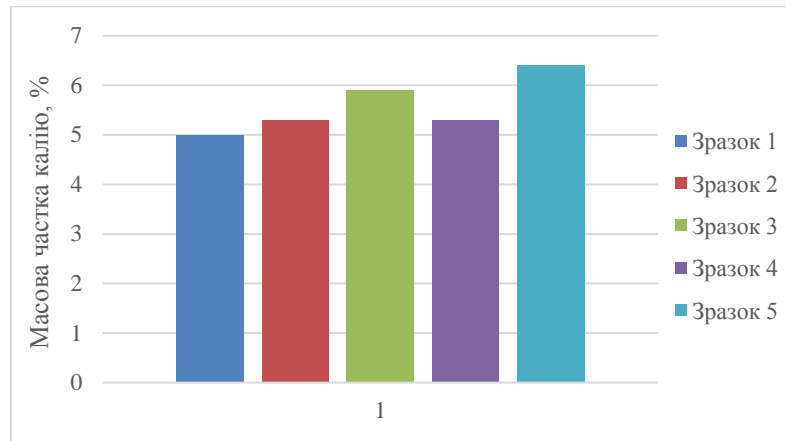


Рисунок 5.6 – Вміст калію у зразках добрив

Виходячи з аналізу графіків, існує певна кореляція між прибавкою урожаю розробленого складу добрива з біочаром і невеликою кількістю накопиченого в рослинах азоту, що може свідчити про зниження вмісту нітратів у ячмені. Пролонгуюча дія добрив дозволила збільшити період надходження поживних речовин у рослини і їх поступове вивільнення. Таким чином, азот і фосфор добрив був використаний на збільшення зеленої маси та її якості. Накопичення і утримання калію у зразках ячменю необхідно для подальшого розвитку вегетативних органів.

## 5.2. Екологічне навантаження на довкілля при виробництві добрив

Техногенне навантаження на навколишнє середовище при виробництві мінеральних добрив потребує на першому етапі проведення аналізу діючих установок одержання типових складних добрив. Для аналізу використовували показники виробництва амонізованого суперфосфату, азотно-фосфорних добрив, азотно-фосфорно-калійних добрив та гранфосу. Амонізований суперфосфат одержують шляхом кислотного розкладу фосфориту сульфатною кислотою. Складні добрива одержують шляхом амонізації фосфатної кислоти амоніаком. При цьому при розкладі фосфатної сировини сульфатною кислотою утворюється такий багатотоннажний відход як фосфогіпс. Гранфос одержують

безкислотним методом шляхом агломерації фосфоритового борошна розчином сульфату амонію. Порівняльний аналіз технологічних схем одержання традиційних кислотних та розроблених безкислотних способів виробництва добрив проведено на базі виробництв ПАТ «Сумхімпром», єдиного в Україні виробника широкої номенклатури складних добрив.

У зв'язку з обмеженнями на постачання апатитового концентрату на підприємства з виробництва фосфатовмісних добрив, впроваджені технології з переробки фосфоритів Близького Сходу і північної Африки, які мають менший вміст  $P_2O_5$ : 28–29 % замість 38–39 %. Відповідно збільшилась у 1,5 рази кількість такого багатотонажного відходу як фосфогіпс на 1 т екстракційної фосфатної кислоти у перерахунку на 100 %  $P_2O_5$  [42]. Модернізація технологічної лінії з виробництва амофосу (вміст фосфору 51 %) з можливістю випуску NPK-добрив (вміст фосфору 15 %), де витратний коефіцієнт фосфатної кислоти значно менший, а також менша кількість фосфогіпсу у відходах, дозволила знизити техногенне навантаження на довкілля. Розглядаючи можливості виробництва складного добрива без вилучення фосфогіпсу у відходи, на підприємстві була розроблена технологія складного добрива марки NPK – 6:11:11, яке характеризується високим вмістом кальцію. Ґрунтуючись на таких властивостях окремих марок фосфоритів, як високий вміст  $P_2O_{5засв.}$ , була опрацьована технологія одержання складних добрив без застосування фосфатної кислоти, так званий безкислотний метод напівсухим способом. Це дозволило знизити вологість гранулята перед сушінням майже у 3 рази і, відповідно, витрати газу та викиди в атмосферу. Отже, впровадження даних технічних рішень дозволяє підвищити екологічність виробництва і суттєво покращити стан довкілля.

Згідно з регламентними нормами викидів пилу при виробництві амонізованого суперфосфату з апатитового та фосфоритового концентратів, складних NPK-добрив на ПАТ «Сумхімпром» та добрив, одержаних безкислотним способом, можна зробити висновок, що зменшення забруднення довкілля характерно тільки для таких технологій (табл. 5.2), що використовують напівсухий метод грануляції – агломерацію дрібнодисперсних порошків

(виробництво гранфосу і фосфорно-калійного добрива) за вологості до 12,5 %, як свідчать дослідження, наведені в розділі 2.3.

Таблиця 5.2 – Норми викидів виробництв

Найменування документа	Значення показника, мг/м <sup>3</sup>
Тимчасовий технологічний регламент виробництва амонізованого суперфосфату з апатитового концентрату	140
Постійний технологічний регламент виробництва амонізованого суперфосфату з алжирського фосфориту	140
Постійний технологічний регламент виробництва складних мінеральних добрив	150
Тимчасовий технологічний регламент виробництва амоній фосфата 2-16-0	880
Технологічний регламент виробництва гранфосу	50
Вихідні дані на проектування дослідно-промислової установки отримання фосфорно-калійного добрива*	20

Примітка: \*Розроблений документ «Исходные данные на проектирование опытно-промышленной установки получения фосфорно-калийного удобрения» передбачає виробництво фосфорно-калійного добрива безкислотним способом, за технологією якого можна виробляти органо-мінеральне добриво пролонгованої дії.

З метою оцінки вкладу різних стадій технологічного процесу в загальну кількість викидів в атмосферу розглянемо виробництво амонізованого суперфосфату, де всі джерела газоподібних викидів забруднюючих речовин обладнані очисними установками. Щорічні проектні норми утворення шкідливих відходів залежо відстадій виробництва у відсотках до загального викиду виробництва представлені в таблиці 5.3 [43].

Аналіз кількості всіх джерел викидів виробництва амонізованого суперфосфату показує, що викиди з систем абсорбції операційного відділення складають приблизно 92 %.

Таблиця 5.3 – Розподіл щорічних норм утворення газоподібних відходів виробництва амонізованого суперфосфату по стадіям (сумарно 10901 м<sup>3</sup>/т)

Назва відходу Стадія утворення	Норма утворення відходу, % від суми	Напрямок використання
1 Пил фосфориту масовою концентрацією до 50 мг/м <sup>3</sup> . Очищене повітря систем аспірації обладнання на стадії розвантаження і прийому фосфориту	2,6	В атмосферу
2 Пил фосфориту масовою концентрацією до 50 мг/м <sup>3</sup> . Очищене повітря систем пневмотранспорту на стадії транспортування фосфориту силосного складу сировини	0,9	
3 Пил фосфориту масовою концентрацією до 50 мг/м <sup>3</sup> . Очищене повітря систем пневмотранспорту на стадії транспортування фосфориту операційного відділення	2,5	
4 Очищені гази систем абсорбції від реакторів, апаратів СГБ, повітря з холодильників «КС», місць пересипання операційного відділення	92	
5 Пил мінерального добрива масовою концентрацією до 50 мг/м <sup>3</sup> . Очищене повітря систем аспірації обладнання складу готового продукту та на вузлі фасування готового продукту	2,0	

Очищені гази систем абсорбції від реакторів, апаратів СГБ, повітря з холодильників «КС», місць пересипання цього відділення можуть містити в собі:

- амоніак із масовою концентрацією, не більше 194,16 мг/м<sup>3</sup>;
- флуор та його сполуки (у перерахунку на флуор), не більше 5 мг/м<sup>3</sup>.

Значна кількість викидів забруднюючих речовин з відділення гранулювання, сушіння, класифікації та охолодження готового продукту

обумовлена необхідністю висушування пульпи суперфосфату, що подається в гранулятор СГБ, з вологістю не менше 36 % [43]. Для оцінки зниження кількості викидів під час виробництва нового виду добрив приймаємо допущення щодо прямої залежності кількості викидів газів системи абсорбції від вологості пульпи. Для виробництва азотно-фосфорного капсульованого добрива пролонгованої дії при нанесенні порошкоподібної фосфатовмісної оболонки на гранули карбаміду шляхом агломерації, вологість шихти, за результатами проведених лабораторних досліджень складає 12,5 %. Оскільки маса оболонки складає близько 50 % від маси капсульованого добрива, то вологість власне гранули становить 6,25 %. Зменшення вологості шихти з 36 % до 6,25 % потребує меншої кількості природного газу для сушки грануляту, а, відповідно, й кількості викидів відділення гранулювання, сушіння, класифікації та охолодження готового продукту, яке можна експертно оцінити з 10000 м<sup>3</sup>/т до 1736,1 м<sup>3</sup>/т, пропорційно зменшенню вологості шихти на сушіння, тобто більше ніж у 5,5 рази. Аргументація щодо зниження витрат природного газу ґрунтується на аналізі роботи виробництв ПАТ «Суміхімпром», дані яких наведено в таблиці 5.4.

Таблиця 5.4 – Норми технологічного режиму виробництв

Найменування документу	Значення показника	
	Вологість шихти (пульпи), %	Витрата палива, кг умовного палива
Постійний технологічний регламент виробництва амонізованого суперфосфату з алжирського фосфориту	36	145
Постійний технологічний регламент виробництва складних мінеральних добрив	26	80
Технологічний регламент виробництва гранфосу	16	50
Вихідні дані на проектування дослідно-промислової установки отримання фосфорно-калійного добрива	12-14	30



Отже, запропоноване технічне рішення з одержання капсульованих органо-мінеральних добрив пролонгованої дії шляхом нанесення фосфатовмісної оболонки на гранули карбаміду при впровадженні у виробництво складних добрив дозволяє суттєво знизити витрати палива, більш ніж у 4 рази, та близько 5,7 рази, зменшити викиди у атмосферу газів із системи абсорбції. Наведені результати є очікуваним економічним та екологічним ефектами, які будуть уточнюватись при розробці вихідних даних на проектування дослідно-промислової установки.

### **5.3. Визначення еколого-економічного ефекту запропонованих технічних рішень при застосуванні екологічно безпечних добрив**

Визначення економічного ефекту, що очікується від застосування органо-мінеральних добрив пролонгованої дії з фосфатовмісним покриттям, у порівнянні з традиційним карбамідом, в сільському господарстві проводимо з урахуванням результатів проведених вегетаційних агрохімічних досліджень з вирощування ячменю, які показали збільшення урожайності на 38 % [44].

Згідно з методикою, викладеною в [46], очікуваний економічний ефект розраховується за формулою:

$$E^1 = (Z_6 - Z_n) \cdot A, \quad (5.1)$$

де  $Z_6$  – змінні витрати (витрати на сировину та теплоенергетичні ресурси) в базовій технології;

$Z_n$  – змінні витрати (витрати на сировину та теплоенергетичні ресурси) у запропонованій технології;

$A$  – обсяг посівних площ.

Під час розрахунку очікуваного економічного ефекту вводимо допущення, що змінюється лише частка собівартості продукції (добрив), яка

використовується при вирощуванні сільськогосподарської продукції. З метою спрощення розрахунків приймаємо, що урожайність ячменю однакова. Кількісні показники внесення добрив за першим варіантом взято з агрохімічних досліджень і наведено в таблиці 5.5.

Таблиця 5.5 - Витрата добрива на 1 га при застосуванні базової технології

Вид добрива	Кількість, кг,			Всього добрива, кг	Ціна добрива, грн/га
	Азот, N <sub>60</sub>	Фосфор,	Калій,		
Карбамід	60	-	-	130,4	3300

*Примітка:* Так, згідно з даними прайсу «Хім-Трейд» (що займає 5-8% частки загальноукраїнського ринку постачання мінеральних добрив, виробляє 100% української аміачної селітри і близько 50-60% українського карбаміду), станом на 5 жовтня 2021 р. вартість карбаміду становила 25300 грн/т на 19.11.2021р.

Отже, загальна вартість добрива при внесенні за базової технології становить 3300 грн/га в цінах жовтня 2021 року [45].

За розробленою технологією (варіант 2), що базується на внесенні мінеральних добрив із фосфатовмісним покриттям з добавками гуматів кальцію та біочару, в якості сировини використовують карбамід і фосфат-глауконітовий концентрат, гумат кальцію, що вироблений на дослідній установці інституту та біочар, одержаний в лабораторних умовах. Показники внесення необхідної кількості добрив за другим варіантом на основі результатів агрохімічних досліджень наведено в таблиці 5.6.

Загальна вартість добрив при внесенні за новою технологією становить 2782 грн/га, у цінах жовтня 2021 року.

Таблиця 5.6 – Витрата добрив на 1 га під час застосування нової технології

Вид сировини	Компонент добрива, кг			Всього добрива, кг	Вартість добрива грн/га
	Азот, N <sub>60</sub>	Фосфор, P <sub>20</sub>	Калій, K <sub>0</sub>		
Карбамід	37,5			81,52	2062,45
Фосфат-глауконітовий концентрат		5,8	2800/т	81,52	228,26
Гумат кальцію			36000/т	5,87	211,32
Біочар		5%	35000/т	16,24	280,0

Впровадження нової технології виробництва добрив потребує певних капітальних вкладень. Враховуючи їх, економічний ефект вдосконаленої технології складе:

$$E_{\text{екон}} = E_1 - K_{\text{в}}, \quad (5.2)$$

де  $E_1$  - очікуваний економічний ефект, грн;

$K_{\text{в}}$  - капітальні вкладення, грн:

- на дообладнання (за попередніми розрахунками, 94 млн грн);

- на наукові та проектні роботи (8,5 млн грн):

$$K_{\text{в}} = 94 + 8,5 = 102,5 \text{ млн грн.}$$

Оскільки середній щорічний обсяг посівних площ ячменю ярового в Україні становить близько 3,6 млн га на 1 рік [46], то очікуваний економічний ефект розраховується наступним чином:

$$E_1 = (3300 - 2782) \cdot 3600000 = 1,86 \text{ млрд грн.}$$

Отже, економічний ефект розробленої, удосконаленої технології складе:

$$E_{\text{екон}} = 1,8648 \cdot 10^9 - 102,5 \cdot 10^6 = 1,7623 \text{ млрд грн на рік.}$$

Термін окупності розраховується наступним чином:

$$T = \frac{K_B}{E} = \frac{102,5 \cdot 10^6}{1,7623 \cdot 10^9} = 0,058 \text{ року.} \quad (5.3)$$

Розрахований термін окупності запропонованого технічного рішення з капсулювання мінеральних добрив досить невеликий, тому дозволяє вважати дану розробку економічно доцільною та перспективною.

## **6 ПОШУК ОПТИМАЛЬНОГО СПОСОБУ ВПРОВАДЖЕННЯ РЕКУПЕРАЦІЙНОЇ СИСТЕМИ ІЗ ЗАСТОСУВАННЯМ ЦИКЛУ МАЙСОЦЕНКО**

У деяких процесах хімічних установок енергія для тепла, електроенергії та сировини може становити до 85 % виробничих витрат [47], що дозволяє говорити про енергетичну ефективність як про важливу складову при проектуванні хімічних установок. Як приклад можна навести хімічну промисловість США, де, незважаючи на використання передових методів забезпечення енергетичної ефективності, витрати на енергію становлять 6 % загальної кількості споживаної енергії [48]. Аналіз, проведений у роботі [49], дозволив виділити такі ініціативні заходи щодо підвищення енергетичної ефективності: удосконалення існуючих процесів; впровадження (комерціалізація) нових процесів; переробка відходів; інвестиції у відновлювані джерела енергії; виробництво продукції, що дозволяє економити енергію.

Аналіз даних [50–52] дозволив дійти невтішного висновку у тому, що майже половину устаткування хімічних установок становлять різні типи теплообмінних апаратів. Для забезпечення енергетичної ефективності таких установок у перспективі потрібне зниження кількості теплообмінників за рахунок розробки нових механізмів утилізації температурно-вологісного потенціалу потоків.

Оцінка собівартості продукції хімічних виробництв показує, що до 70 % цього показника посідає вартість сировини та її підготовки, зокрема і зміні його температурного потенціалу [53,54]. Цей факт вимагає подальшого перегляду до проблеми підготовки сировини та напівпродуктів, а також утилізації відходів виробництва як у фізичному, так і в енергетичному вигляді.

Процеси гранулювання як засіб формування різних речовин з розчинів і розплавів набув широкого поширення у хімічній промисловості [55–57], а й у фармацевтичній [58–61] та інших галузях, і навіть під час створення гранул з особливими властивостями [62]. Наявність високотемпературних теплоносіїв та

вологих потоків у грануляційних процесах відкриває перспективу впровадження та успішної реалізації ефективних способів утилізації температурно-вологісного потенціалу грануляційних установок.

Методи підвищення енергетичної ефективності хімічних установок можна розділити на два великі блоки:

Блок 1. Удосконалення конструкції апаратів хімічної установки та організації руху потоків у них (внутрішня ефективність).

Блок 2. Удосконалення організації руху потоків та методів зміни їх потенціалу у хімічній установці (зовнішня ефективність).

Прикладами методів першого блоку можуть бути авторські розробки щодо використання активних гідродинамічних режимів в апаратах [63], проектування багатоступінчастих [64] та багатофункціональних [65] апаратів.

Ключовим фактором у підвищенні енергоефективності обладнання тепло- та масообміну є забезпечення фактичних високих питомих показників тепломасообміну (коефіцієнти теплопередачі, тепловіддачі, теплопровідності тощо), а також необхідних властивостей тепломасообмінних поверхонь. Так, наприклад, використання рекуператорів у яких один або кілька теплоносіїв зазнає фазових перетворень (конденсація, випаровування або кипіння) дозволяє істотно підвищити ефективність процесів рекуперації (за результатами експериментальних досліджень GTI - Maisotsenko-Cycle Based Humidified Air Recuperator (HAR) and Water Heater Validation) . Застосування нових термодинамічних принципів, наприклад, для повітряного випарного охолодження великих кількостей теплоносія в градирнях, дозволить отримати значний економічний ефект [66]. можуть застосовуватися нові матеріали та покриття, використання яких дозволяє помітно знизити енерговитрати та підвищити надійність обладнання, наприклад, відмовитися від насоса при використанні вискоефективних капілярно-пористих матеріалів [67, 68] тощо. Використання ефективного тепломасообмінного обладнання дозволяє розробити нові схемні рішення для багатьох промислових процесів та установок.

Найпростішим рішенням у другому блоці методів підвищення енергетичної ефективності є використання рециркуляції теплоносія без додаткової підготовки. Приклад успішного застосування такого рішення представлений у роботі [69] для багатоступінчастих поличних сушильних апаратів. Однак, існують і складніші, але ефективніші способи.

Зокрема, для хімічної промисловості, де одночасно використовуються безліч потоків різних речовин з різними термічними та калоричними параметрами, важливо забезпечити максимально повний та позитивний вплив одних процесів на інші. Так, наприклад, в утилізаційному ежекторному модулі для схеми грануляції пористої аміачної селітри [66, 70], крім основного ефекту – переведення оксидів азоту у вищі оксиди, спостерігається значний приплив теплової енергії (вторинний енергетичний ресурс), яка може і має бути корисно використана нагрівання, сушіння, зволоження, генерація електроенергії [71, 72] тощо) для потреб власної ділянки хімічного виробництва або суміжних підприємств/цехів або населення. Для забезпечення повноти використання вторинних енергетичних ресурсів доцільно організувати ступінчасте відведення тепла і рекуперацію т.к. це дасть змогу ефективніше розподілити енергію між її споживачами. У зв'язку з цим застосування апаратів випарного непрямо-регенеративного охолодження (М-цикл) бачиться раціональним рішенням, тому що дозволяє ефективно відводити тепло і отримувати високоентальпійні потоки сильно зволоженого повітря для їх подальшого використання з метою зволоження, нагрівання або генерації електроенергії. Крім того, ці апарати використовують відновлювану енергію навколишнього повітря [73] що у доповненні з іншими джерелами відновлюваної енергії (наприклад, сонячної) дає можливість розробки модулів з використанням зворотного субатмосферного циклу Брайтона і зробити значний позитивний внесок у ефективність загальної схеми.

Субатмосферний зворотний цикл Брайтона вивчався рядом дослідників та організацій (GTI, SoftInWay), які наводять цікаві та перспективні результати теоретичних розрахунків [72-74]. Серед основних наукових та практичних

проблем у реалізації даного циклу вирішальне значення має розробка високоефективного тепломасообмінного апарату – рекуператора. Як дослідники пропонують використовувати пластинчасті або спіральні тепломасообмінні апарати, що реалізують принципи випарного непрямо-регенеративного охолодження (М-циклу). Тому дослідження потенціалу апаратів цього класу в схемах хімічних виробництв для вирішення завдань рекуперації тепла та виробництва енергії є актуальним.

Починаючи з 50г. минулого століття ексергетичний метод аналізу знайшов своє застосування у різних галузях промисловості і з того часу є одним з основних методів аналізу, оцінки, а також оптимізації систем [75]. Такий підхід є досить гнучким та універсальним як для енергетичних систем загалом, так і для окремих їх компонентів [76–82]. Аналіз компонентів схеми дозволяє оцінити їх ефективність окремо, і навіть визначити той елемент, що тягне у себе зниження ефективності системи загалом. У публікації [83] автори описують основи та рекомендації щодо застосування апарату ексергетичного аналізу.

В основі даного методу лежить підхід при якому в системі, що розглядається, всі її потоки зводяться до єдиної «заходу», тобто «ексергії» і поділяючи їх на витрати і корисний ефект («паливо і продукт») [83], а також відокремлюючи втрати і деструкцію ексергії [84]. За наявності вихідних даних по переліченим вище потокам, ще на етапі проектування установки/апарату можна оцінити ексергетичну ефективність і в разі необхідності і можливості підвищити її.

У роботі [85] представлена методика ексергетичного аналізу технологічних потоків виробництва фосфорно-калійних добрив, у якій використано класичний підхід як енергетичної системи. За цією методикою ексергія виробленого продукту визначається виходячи з його параметрів стану, що не зовсім коректним у цьому випадку. У системах, у яких виробляється матеріальний продукт, корисним ефектом є його якість, стан і кількість на виході з мінімальними витратами на його виробництво, а не вихідні термодинамічні параметри (що впливають на ексергетичний ККД системи).



## **7 ТЕОРЕТИКО-МЕТОДИЧНІ ЗАСАДИ УПРАВЛІННЯ ПРОСУВАННЯМ ГРАНУЛЬОВАНИХ ДОБРИВ ПРОЛОНГОВАНОЇ ДІЇ НА ВНУТРІШНЬОМУ ТА ЗОВНІШНЬОМУ РИНКАХ**

### **7.1 Методологія управління просуванням зелених інновацій**

На сьогоднішній день формування попиту і стимулювання збуту зелених інновацій займає особливе місце у маркетинговій діяльності підприємства. Відповідно до Зеленого курсу [86], ухваленого Європейською Комісією, саме зелені інновації є тим інструментом, який забезпечить досягнення цілей сталого розвитку та трансформацію країн Європи у справедливе та процвітаюче суспільство із сучасною, ресурсозберігаючою, конкурентоспроможною та кліматично нейтральною економікою, зростання якої не буде залежати від використання ресурсів. Обмеженість у власних ресурсах, труднощі з залученням інвестиційних та висока вартість кредитних ресурсів вимагають створення нових підходів до управління політикою просування зелених інновацій, заснованих на оцінках її ефективності з урахуванням рівня залучання споживачів. Методика проведення таких розрахунків на сучасному етапі достатньо розроблена, однак існують певні труднощі щодо оцінки ефективності каналів просування інновацій та обґрунтування доцільності спрямування обмежених ресурсів у тому чи іншому напрямку. Теоретико-методичні та прикладні аспекти маркетингової політики комунікацій досить широко розглянуті у дослідженнях науковців, як вітчизняних, так і закордонних. Однак не зважаючи на це, окремі питання, зокрема щодо обґрунтування каналів просування зелених інновацій залишаються вирішеними не в повній мірі, що обумовлено специфікою самої інновації.

Метою роботи є удосконалення наукових засад та теоретико-методологічних принципів управління просуванням зелених інновацій на основі концепції сталого інноваційного випередження. Для її реалізації були поставлені такі завдання: проаналізувати переваги та недоліки основних каналів просування; дослідити існуючі критерії щодо вибору каналів просування;

розробити комплексну методику оцінки каналів просування та рекомендації щодо їх привабливості та доцільності вибору при розробці комунікаційної політики підприємства; розробити моделі поведінкової реакції споживача залежно від типу зеленої інновації та рівня залучення.

Існують різні підходи до визначення дефініції «просування». У широкому розумінні цей термін розглядається як синонім маркетингової комунікації, що сприяє «інформуванню підприємств й забезпечує реалізацію зворотного зв'язку» [87]. У вузькому розумінні слова під просуванням розуміють «сукупність дій і засобів для впливу на ринок, а саме: інформування ринку про інновацію, формування потреби у споживачів, регулювання попиту тощо» [87]. У роботі [88] це поняття розглядається як «форма інформування споживача про товар (послугу), суб'єктів господарювання тощо». Авторами роботи [89] просування визначено як комплекс заходів, спрямованих на завоювання ринкового сегменту, що охоплюють дослідження потенційного ринку, рекламні заходи, вибір форм реалізації товару. У роботі [90] цей термін визначається як «набір заходів комплексу маркетингу, що спрямовані передачу прав власності на товар від виробника до кінцевого споживача найбільш ефективним способом з використанням інноваційних технологій».

Найбільше відповідає поглядам авторів визначення, що наведено у роботі Ф. Котлера [91], який визначає категорію просування як «сукупність комунікаційних інструментів (каналів), таких як». Серед комунікаційних інструментів виділяють такі як: реклама, стимулювання збуту, персональний продаж, зв'язки з громадськістю, прямий маркетинг, пропаганда, спонсорство, мерчандайзинг, участь у виставках, популяризація, ділове листування та засоби Internet.

Для вибору оптимальних варіантів каналів просування слід порівняти їх переваги і недоліки за бальною шкалою оцінювання. При цьому важливим є представлення всіх показників у співвимірному вигляді.

Методичний підхід щодо вибору каналів просування зелених інновацій включає такі етапи:

1) формування експертним шляхом переліку критеріїв для оцінки каналів просування ( $M$ ). Основними критеріями можуть бути наступні: мобільність; тривалість контакту; вибірковість аудиторії; собівартість; забезпечення результату; утримання уваги адресата; можливість повтору; географічна вибірковість аудиторії; конкретність; якість; тривалість впливу; наявність вторинної аудиторії; селективність аудиторії; позитивне ставлення споживача; оперативність; професійність; особистий характер; охоплення аудиторії; термін підготовки до виходу; витрати на один контакт; довговічність; якість.

2) Експертна оцінка критеріїв. Для кожного каналу просування за кожним з критеріїв оцінки кожним експертом виставляється бальна оцінка за обраною шкалою. Бальні оцінки (ступінь відповідності) для кожного варіанту каналу просування проставляються кожним експертом за наступною шкалою ступеня відповідності: дуже хороший - 5 балів, хороший - 4 бали, задовільний - 3 бали, слабкий - 2 бали, дуже слабкий - 1 бал. За результатами Результати оцінок кожного з експертів заносяться у таблицю (табл. 7.1), в результаті чого формується оціночна таблиця першого типу.

Таблиця 7.1 – Експертні оцінки  $j$ -го варіанту  $k$ -го каналу просування

Критерії, $M_i$	Оцінки експертів,					Сумарні оцінки, $O'_{kji}$
	1	...	$d$	...	$N$	
1	$O'_{kj11}$	...	$O'_{kj1d}$	...	$O'_{kj1N}$	$\sum_{d=1}^N O'_{kj1d}$
...	...	...	...	...	...	
$i$	$O'_{kji1}$	...	$O'_{kjid}$	...	$O'_{kjiN}$	$\sum_{d=1}^N O'_{kjid}$
...	...	...	...	...	...	
$m$	$O'_{kjm1}$	...	$O'_{kjm1}$	...	$O'_{kjmN}$	$\sum_{d=1}^N O'_{kjmd}$

Примітка:  $M_i$  –  $i$ -й критерій оцінки,  $i \in [1; m]$ ;  $m$  – кількість критеріїв оцінки;  $N$  – кількість експертів;  $d$  – порядковий номер експерта.

3) Визначення вагомостей критеріїв оцінки каналів просування ( $q_i$ ) методом попарного порівняння кожного з них. Для цього на основі оцінок кожного з експертів будуються оціночні таблиці другого типу (табл. 7.2), з яких потім формують оціночні таблиці першого типу (табл. 7.3) шляхом занесення підсумкових даних таблиць другого типу (див. табл. 7.2), побудованих для кожного з експертів.

Таблиця 7.2 – Попарне порівняння критеріїв оцінки кожним  $d$ -им експертом

Критерії	1	2	3	4	5	.....	m	$\Sigma$
1		0	0	0	1		1	$O_{1d}$
...	1		1	1	1		0	...
$i$	1	0		0	0		1	$O_{id}$
...								...
m	0	1	0	1	0			$O_{md}$

Примітка: 1- критерій у рядку важливіший, ніж критерій у стовпчику; 0 - критерій у стовпчику важливіший, ніж критерій у рядку.

Таблиця 7.3 – Підсумкові значення попарних порівнянь критеріїв оцінки каналів просування експертами

Критерії, $M_i$	Порядковий номер експерта, $d$				
	1	...	$d$	...	N
1	$O_{11}$	...	$O_{1d}$	...	$O_{1N}$
...	...	...	...	...	...
$i$	$O_{i1}$	...	$O_{id}$	...	$O_{iN}$
...	...	...	...	...	...
m	$O_{m1}$	...	$O_{md}$	...	$O_{mN}$
Сумарні оцінки	$\sum_{i=1}^m O_{i1}$	...	$\sum_{i=1}^m O_{id}$	...	$\sum_{i=1}^m O_{iN}$

На основі оціночних таблиць (табл. 7.2 та табл. 7.3) розраховуємо вагомості для кожного з критеріїв оцінки каналів просування  $M$  за наступною формулою:

$$q_i = \frac{1}{N} \cdot \sum_{d=1}^N \frac{O_{id}}{\sum_{i=1}^m O_{id}}, \quad (7.1)$$

де  $q_i$  – вагомість  $i$ -го критерію каналу просування  $M$ ,  $i \in [1; m]$ ;

$O_{id}$  – оцінка  $i$ -го критерію каналу просування, визначена за оцінками експерта  $d$ ,  $d \in [1; N]$ ;

$d$  – порядковий номер експерта, який проставив оцінку;

$i$  – порядковий номер критерію  $M$ ;

$m$  – кількість критеріїв  $M$ ;

$N$  – кількість експертів;

4) Побудова кумулятивної оціночної таблиці (табл. 7.4) на основі підсумкових оцінок таблиці 7.1.

5) Визначення інтегральної оцінки каналу просування за формулою:

$$O'_{\Sigma kj} = \sum_{i=1}^m O'_{kji} \cdot q_i \quad (7.2)$$

де  $O'_{\Sigma kj}$  – зважена оцінка  $j$ -го варіанту  $k$ -го каналу просування,  $j \in [1; n]$ ,  $k \in [1; K]$ ;

$O'_{ij}$  – бальна оцінка  $i$ -го критерію  $j$ -го варіанту  $k$ -го каналу просування,  $i \in [1; m]$ ,  $j \in [1; n]$ ,  $k \in [1; K]$ ;

$K$  – кількість каналів просування;

$m$  – кількість критеріїв каналів просування;

$n$  – кількість варіантів  $k$ -го каналу просування;

$q_i$  – вагомість  $i$ -го критерію  $k$ -го каналу просування,  $i \in [1; m]$ ,  $k \in [1; K]$ ;

$k$  – порядковий номер каналу просування,  $k \in [1; K]$ ;

$i$  – порядковий номер критерію каналу просування,  $i \in [1; m]$ ;

$j$  – порядковий номер варіанту каналу просування,  $j \in [1; n]$ .

Таблиця 7.4 – Оцінка каналів просування

Канал просування ( $k$ ) та його критерії ( $M_i$ )	Вагомість критерію каналу просування, $q$	Варіанти каналу просування, $j$			
		1	2	....	n
Канал просування 1					
Критерій $M_1$	$q_1$	$O'_{111}$	$O'_{121}$	....	$O'_{1n1}$
Критерій $M_2$	$q_2$	$O'_{112}$	$O'_{122}$	....	$O'_{1n2}$
·	·	·	·	....	·
·	·	·	·	....	·
·	·	·	·	....	·
Критерій $M_m$	$q_m$	$O'_{11m}$	$O'_{12m}$	....	$O'_{1nm}$
Разом (1)	1	$O'_{\Sigma 11}$	$O'_{\Sigma 12}$	....	$O'_{\Sigma 1n}$
....	....	....	....	....	....
Канал просування $k$					
Критерій $M_1$	$q_1$	$O'_{k11}$	$O'_{k21}$	....	$O'_{kn1}$
Критерій $M_2$	$q_2$	$O'_{k12}$	$O'_{k22}$	....	$O'_{kn2}$
·	·	·	·	....	·
·	·	·	·	....	·
·	·	·	·	....	·
Критерій $M_m$	$q_m$	$O'_{k1m}$	$O'_{k2m}$	....	$O'_{knm}$
Разом ( $k$ )	1	$O'_{\Sigma k1}$	$O'_{\Sigma k2}$	....	$O'_{\Sigma k1n}$
....	....	....	....	....	....
Канал просування $K$					
Критерій $M_1$	$q_1$	$O'_{K11}$	$O'_{K21}$	....	$O'_{Kn1}$
Критерій $M_2$	$q_2$	$O'_{K12}$	$O'_{K22}$	....	$O'_{Kn2}$
·	·	·	·	....	·
·	·	·	·	....	·
·	·	·	·	....	·
Критерій $M_m$	$q_m$	$O'_{K1m}$	$O'_{K2m}$	....	$O'_{Knm}$
Разом ( $K$ )	1	$O'_{\Sigma K1}$	$O'_{\Sigma K2}$	....	$O'_{\Sigma K1n}$

Найбільш привабливим каналом просування є той канал, який має найбільшу інтегральну оцінку.

Наступним кроком є оцінка рівня залучення споживачів за допомогою альтернативних каналів просування зеленої інновації.

За своєю сутністю загальний рівень залучення споживачів ( $I_{max}$ ) – це постійна величина, що визначається рівнями реакції споживачів на інструменти комунікаційної політики (А – емоційного рівня, В – поведінкового рівня, С – пізнавального рівня). У формулізованому вигляді загальний рівень залучення споживача можна представити наступною формулою:

$$I_{max} = \sum_{i=1}^3 f_i(I, t) \rightarrow 1, \quad (7.3)$$

де  $I_{max}$  – загальний рівень залучення споживача,  $I_{max} \rightarrow 1$ ;

$i$  – порядковий номер рівня реакції споживача на інструменти комунікаційної політики підприємства, а саме:  $A = f_1(I, t)$  – емоційний рівень,  $B = f_2(I, t)$  – поведінковий рівень,  $C = f_3(I, t)$  – пізнавальний рівень;

$I$  – рівень залучення споживача,  $I \in [0; 1]$ ;

$t$  – період часу,  $t \in T$ ;

$T$  – еколого-економічний цикл зеленої інновації.

Залежність між емоційним рівнем реакції споживачів  $A = f_1(I, t)$ , поведінковим рівнем реакції споживача  $B = f_2(I, t)$  та пізнавальним рівнем реакції споживачів  $C = f_3(I, t)$  від рівня залучення  $I$  представлено на рис. 7.1

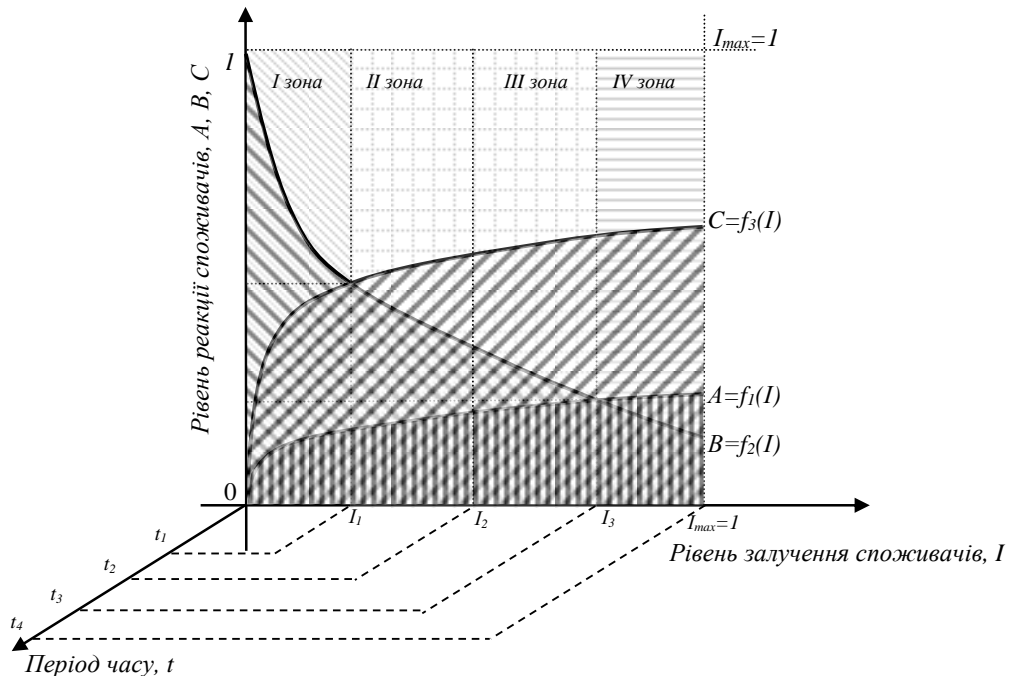


Рисунок 7.1 – Гіпотетичні моделі пізнавальної, емоційної та поведінкової реакції споживачів (удосконалено авторами на основі [99])

Враховуючи ієрархічну залежність рівнів реакції споживачів, різні моделі зв'язку можна описати через взаємозв'язок та послідовність пізнавального (С), емоційного (А) та поведінкового процесів (В), які будуть відповідати різним зонам залучення споживачів альтернативними варіантами каналів просування, а саме:

I зона – зона низького рівня залучення, для якою характерним є консерватизм споживачів та процесу споживання.

Зона II – зона залучення нижче середнього рівня.

Зона III – зона залучення середнього та вище середнього рівня.

Особливістю зони II та зони III є те, що для них виконуються наступні умови  $C > B > A$  або  $f_1(I, t) < f_2(I, t) < f_3(I, t)$ .

IV зона – зона високого рівня залучення.

Гіпотетичні моделі поведінки споживачів залежно рівнів їх залучення та типів зелених інновацій представлено в табл. 7.5.

Характер представлених гіпотетичних моделей споживчої поведінки залежить від значень функції, що описують пізнавальний рівень  $C=f_3(I, t)$ , емоційний рівень  $A=f_1(I, t)$  та поведінковий рівень реакції споживачів  $B=f_2(I, t)$ , при загальному рівні залучення  $I_{max}=1$  для різних типів зелених інновацій та функцій, що описують криві а саме:

$$p1: C > A, C(I_{max}, t) \rightarrow 0,5; A(I_{max}, t) \rightarrow 0,5; B(I_{max}, t) \rightarrow 0;$$

$$p2: A > C, C(I_{max}, t) \rightarrow 0,5; A(I_{max}, t) \rightarrow 0,5; B(I_{max}, t) \rightarrow 0;$$

$$p3: C > A, C(I_{max}, t) \rightarrow 1; A(I_{max}, t) \rightarrow 0; B(I_{max}, t) \rightarrow 0;$$

$$p4: A > C, C(I_{max}, t) \rightarrow 0; A(I_{max}, t) \rightarrow 1; B(I_{max}, t) \rightarrow 0;$$

$$p5: C > A, C(I_{max}, t) \rightarrow 0,33; A(I_{max}, t) \rightarrow 0,33; B(I_{max}, t) \rightarrow 0,33;$$

$$p6: A > C, C(I_{max}, t) \rightarrow 0,33; A(I_{max}, t) \rightarrow 0,33; B(I_{max}, t) \rightarrow 0,33.$$



Таблиця 7.5 – Гіпотетичні моделі поведінки споживачів (удосконалено авторами на основі [99])

		Зони залучення споживачів		
		Зона I	Зона II та Зона III	Зона IV
Тип зеленої інновації	p1			
	p2			
	p3			
	p4			
	p5			
	p6			

Таким чином, авторами розроблено новий методологічний підхід до управління просуванням зелених інновацій на основі концепції сталого випередження, відповідно до якої підприємства у своїй інноваційній діяльності мають орієнтуватися на радикальні та ординарні зелені інновації, які формують нові потреби, а отже обумовлюють труднощі з прогнозуванням показників попиту на інновацію, зокрема точністю очікуваних показників збуту інновації за етапами її еколого-економічного циклу, який охоплює етапи життєвого та кастомізаційного циклів.

Запропонований методологічний підхід до оцінки каналів просування зелених інновацій може бути використаний суб'єктами господарювання при формуванні збутової та комунікаційної політики, а саме на етапі вибору каналу на підготовчому етапі життєвого циклу інновацій, а також на інших етапах її життєвого циклу.

## **7.2. Оптимізаційне моделювання просування зелених інновацій на основі форсайтингу поведінкової реакції стейкхолдерів**

При оцінюванні ефективності комунікаційної політики підприємства слід враховувати такі її складові:

1) *економічну*, яка розраховується як відношення зростання прибутку та вартості підприємства до суми відповідних витрат, пов'язаних з реалізацією його комунікаційної політики;

2) *психологічну*, яка визначається рівнем впливу комунікаційної політики підприємства на стейкхолдера;

3) *соціальну ефективність*, що характеризується ступенем впливу заходів просування на суспільство в цілому. На відміну від попереднього виду ефективності, соціальний вплив не є короткостроковою емоційною реакцією на комплекс заходів, а формує стійку поведінку та відповідний рівень соціальної відповідальності.

Слід зазначити, що ефективність комунікаційної політики значною мірою залежить від бюджету видатків на інструменти комунікації. Питання оптимізації бюджету комунікаційної політики з урахуванням ефективності альтернативних інструментів комунікації та їх синергії досліджувалися вітчизняні та закордонними науковцями [99-103, 105-107, 109-115]. В той же час, незважаючи на достатньо ґрунтовні наукові розробки та дослідження, питання моделювання просування зелених інновацій з урахуванням поведінкової реакції стейкхолдерів та впливу інструментів комунікаційної політики.

Метою дослідження є удосконалення теоретико-методологічного підходу до оптимізаційного моделювання просування зелених інновацій на основі форсайтингу поведінкової реакції стейкхолдерів на інструменти комунікації, а також ефективності комунікаційної політики в цілому.

В теорії маркетингу розрізняють такі рівні реакції стейкхолдера залежно від процесу залучення:

- *пізнавальний рівень (С)* – встановлення стейкхолдером зв'язку між накопиченими ним попередньо знаннями та отриманою інформацією щодо зеленої інновації;

- *емоційний рівень (А)* – суб'єктивне оцінюванням стейкхолдером інформації щодо зеленої інновацій та формування на цій основі власного ставлення до даної зеленої інновації;

- *поведінковий рівень (В)* – поведінкова реакція або безпосередня дія, характер якої залежить від категорії стейкхолдера, зокрема, з боку споживача – купівля та споживання (експлуатація/використання/застосування) зеленої інновації; з боку інвесторів – прями або портфельні інвестиції у компанію; з боку конкурентів – формування відповідної маркетингової стратегії тощо).

Погоджуючись з думкою фахівців з маркетингових комунікацій, що рівні поведінкової реакції стейкхолдерів ієрархічно пов'язані послідовністю дій, пов'язаних з процесами пізнання, відчуття та безпосередньої дії (поведінки), авторами запропоновано визначати прогностичний рівень поведінкової реакції у момент часу  $t$  за такою формулою:

$$C(t) + A(t) + B(t) = R(t), \quad (7.4)$$

де  $C(t)$  – пізнавальна складова у момент часу  $t$ ;  
 $A(t)$  – емоційна складова у момент часу  $t$ ;  
 $B(t)$  – поведінкова складова у момент часу  $t$ ;  
 $R(t)$  – прогнозний рівень поведінкової реакції у момент часу  $t$ ,  $R(t)=\text{const}$ ;  
 $t$  – горизонт прогнозування,  $t \in T$ ;  $T$  – еколого-економічний цикл зеленої інновації.

Для оптимізації процесу просування зелених інновацій з урахуванням форсайтингу рівнів залучення та реакцій споживачів запропоновано застосовувати таку модель, яка також дозволяє оптимізувати розподіл витрат на інструменти маркетингової політики комунікації:

$$\left\{ \begin{array}{l} E(S, TC, \sigma, t) \rightarrow \max \\ \sum_{i=1}^n r_i(t) \cdot x_i(t) \rightarrow \max \\ TC(t) \rightarrow \text{opt} \\ S = \{S_k\} = (f, X, P, R, t, F) \rightarrow \text{opt}, \\ \sum_{i=1}^n p_i(t) \cdot x_i(t) \leq TC \\ 0 \leq x_i \leq u_i, i \in [1; n] \\ F = \{F_k\} = (f, A, B, C, I, \tau, R_j, t) \\ A + B + C = 1 \\ X = \{x_1, x_2, \dots, x_n\} \\ P = \{p_1, p_2, \dots, p_6\}, \\ R_j \in [R_j^{\min}; R_j^{\max}], j \in [1; 2] \\ R_1 = \frac{A}{B}, R_2 = \frac{C}{B} \end{array} \right. \quad (7.5)$$

де  $E$  – ефективність комунікаційної політики;  
 $S$  – множина сценаріїв поведінкової реакції стейкхолдерів;  
 $S_k$  – подія обрання  $k$ -го сценарію;  
 $TC$  – бюджет просування, грн.;

- $\sigma$  – синергетичний ефект від охоплення засобами просування;  
 $t$  – горизонт прогнозування;  
 $r_i$  – охоплення  $i$ -м засобом просування,  $i = [1; n]$ , кількість осіб;  
 $i$  – порядковий номер засобу просування,  $i = [1; n]$ ;  
 $x_i$  – кількість комунікаційних одиниць засобу, од.,  $i = [1; n]$ ;  
 $X$  – множина інструментів комплексу просування,  $X = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$ ;  
 $P$  – сукупність типів інновацій (табл. 7.6),  $P=(p_1, p_2, p_3, \dots, p_m)$ ,  $m \in [1; 6]$ ;  
 $F$  – множина значень функції  $f$ , що відповідають повній групі сценаріїв;  
 $F_k$  – значення функції  $f$ , що відповідає сценарію  $k$ ;  
 $p_i$  – вартість комунікаційної одиниці засобу просування, грн.;  
 $u_i$  – обмеження обсягу засобу в  $i$ -му носії;  
 $A$  – афективна (*affective*) складова поведінкової реакції;  
 $B$  – конативна (*behavior*) складова поведінкової реакції;  
 $C$  – когнітивної (*cognitive*) складова поведінкової реакції;  
 $\tau$  – індекс реакції стейкхолдерів (детальніше дивись [94]);  
 $R_j$  – відношення емоційної та пізнавальної реакцій до конативної реакції,  
де  $j = \overline{1,2}$  (табл. 7.7);  
 $R$  – прогнозний рівень поведінкової реакції (табл. 7.6),  $R \rightarrow 1$ ;  
 $I$  – рівень залучення стейкхолдерів.

Найбільша ефективність маркетингової комунікаційної політики досягається за умови відповідності показників  $R_j$ , розрахованих для кожної групи стейкхолдерів, та показника  $R_j$ , розрахованого для всього комплексу просування, одній з оцінних зон  $[1; 1,25) \cup [1,25; 2) \cup [2; +\infty)$ , яка обов'язково має бути спільною для досліджуваних показників.

Таблиця 7.6– Типи інновацій та їх характеристика при максимальному рівні залучення ( $I_{max}$ ) (удосконалено авторами на основі [104])

Тип інновації	Характеристика типів інновацій	Метод сприйняття	Частка складових реакції при $I_{max}$	Особливості реакції, $I$
1	2	3	4	5
p1	Брендові, іміджеві, статусні	Інтелектуальний метод $C > A$	$C(I_{max}) \rightarrow 0,5;$ $A(I_{max}) \rightarrow 0,5;$ $B(I_{max}) \rightarrow 0$	Афективна та конативна реакції є домінантними
p2		Афективний метод $A > C$		
p3	Технологічно складні інновації з високим рівнем кастомізації та тривалим терміном служби	Інтелектуальний метод $C > A$	$C(I_{max}) \rightarrow 1;$ $A(I_{max}) \rightarrow 0;$ $B(I_{max}) \rightarrow 0$	Поведінка споживача має тривалий пошуковий характер з обов'язковими елементами як суб'єктивного, так і об'єктивного оцінювання інновації
p4	Високовартісні інновації, що орієнтовані на емоційну реакцію стейкхолдерів	Афективний метод $A > C$	$C(I_{max}) \rightarrow 0;$ $A(I_{max}) \rightarrow 1;$ $B(I_{max}) \rightarrow 0$	Поведінка споживача має домінуючий емоційний характер, процес інформаційного пошуку є нетривалим, загальним/поверхневим
p5	Інновації, орієнтовані на рутинне споживання	Інтелектуальний метод $C > A$	$C(I_{max}) \rightarrow 0,33;$ $A(I_{max}) \rightarrow 0,33;$ $B(I_{max}) \rightarrow 0,33$	Формування прихильного ставлення до зеленої інновації відбувається доволі швидко, корисність такої інновації для стейкхолдера є високою, за відсутності бюджетного обмеження – максимально швидко досягається максимальний рівень залучення
p6		Афективний метод $A > C$		

Таблиця 7.7 – Рівні поведінкової реакції стейкхолдерів (удосконалено авторами на основі [104])

<i>Значення показника <math>R_j</math></i>	<i>Характеристика реакції стейкхолдера</i>
$0 \leq R_j < 0,5$	недостатня
$0,5 \leq R_j < 0,8$	слабка
$0,8 \leq R_j < 1,0$	незначна
$1,0 \leq R_j < 1,25$	помірна
$1,25 \leq R_j < 2,0$	достатня
$R_j \geq 2,0$	висока

Показник  $R_j$ , що характеризує весь комплекс просування, пропонується визначати за формулою:

$$R_j = \frac{f_1(I, x, t)}{f_2(I, x, t)} \quad (7.6)$$

$$R_j = \frac{f_3(I, x, t)}{f_2(I, x, t)} \quad (7.7)$$

Для оцінки прогнозованого рівня залучення стейкхолдерів рекомендовано застосовувати методика, досліджену в роботі [104].

Оцінку рівня залучення споживачів рекомендовано виконувати у такій послідовності:

1. Сформувати групи факторів залучення.
2. На основі експертних оцінок визначити рівень впливу кожної групи факторів на процес ухвалення рішення стейкхолдерами за шкалою [0;10], де 0 – не впливає, 10 – має найбільший вплив.
3. Провести оцінку рівня залучення для кожної групи факторів та загального рівня залучення.
4. Графічно представити отримані результати у вигляді профілю залучення.

5. Провести аналіз відхилень від середнього рівня та розробити рекомендації для підвищення рівня залучення.

Для оцінки рівня залучення фактори рекомендовано поділити на такі групи:

- особистісні фактори стейкхолдера;
- фактори характеристики інновації (зокрема, етап життєвого циклу товару, диференціація товару, рівень конкурентоспроможності товару, якісні характеристики тощо);
- фактори ризику;
- цінові фактори;
- ринкові фактори (зокрема, обсягу і розміру ринку);
- фактори прибутковості і обсягів збуту; витрати конкурентів;
- ситуативні фактори;
- фінансові ресурси.

Оцінку кожної групи факторів  $\theta_i$  запропоновано розраховувати за формулою:

$$\theta_i = 0,1m \sum_{j=1}^m \theta_{ij}, \quad (7.6)$$

де  $\theta_{ij}$  – експертна оцінка  $j$ -го фактора в групі  $i$ ,  $\theta_{ij} \in [0;10]$ ,  $j \in [1;m]$ ;  
 $m$  – загальна кількість факторів  $i$ -ої групи.

Загальну оцінку рівня залучення  $\theta$  пропонується визначатися за формулою:

$$\theta = 0,1n \cdot m \sum_{i=1}^n \sum_j^m \theta_{ij}, \quad (7.7)$$

де  $n$  – загальна кількість визначених експертним шляхом досліджуваних груп факторів,  $i \in [1;n]$ .



За результатами попередніх розрахунків побудуємо профіль залучення, на якому також покажемо лінію тренду (рис. 7.2).

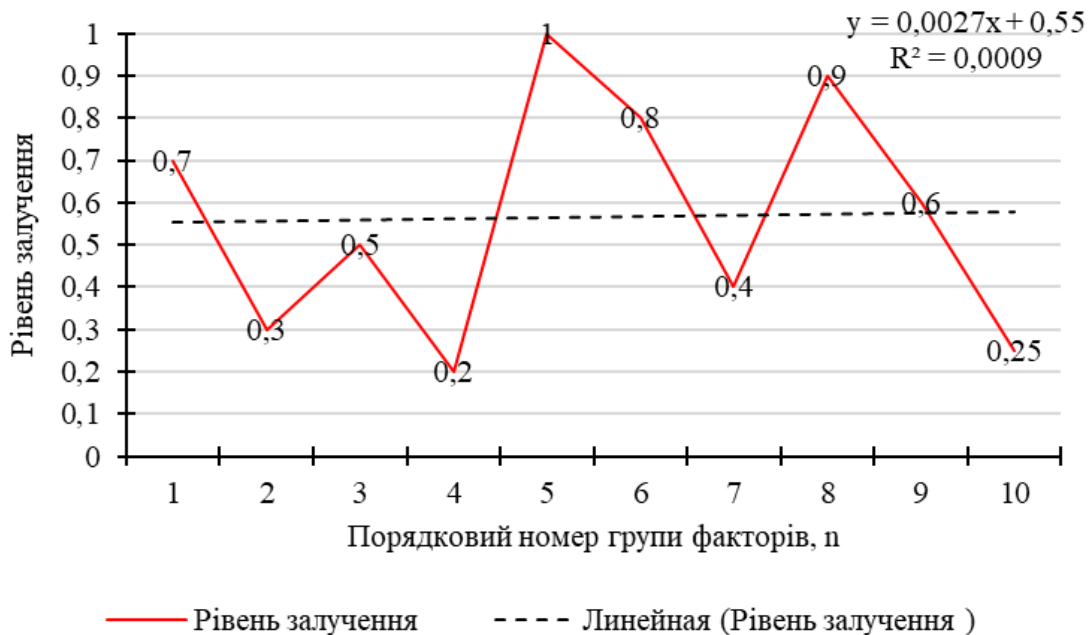


Рисунок 7.2 – Профіль залучення стейкхолдерів (удосконалено авторами на основі [104])

Важливо відзначити, що для співставності профілів та подальшого їх аналізу необхідно чітко дотримуватися обраної нумерації факторів та груп факторів, не змінюючи їх місцями від профіля до профіля. Недотримання цієї умови призведе до викривлення даних та унеможливить співставність профілів для подальшого їх аналізу.

Підводячи підсумки, слід зазначити, що авторами розроблено новий теоретико-методологічний підхід до форсайтингу поведінкової реакції стейкхолдера на основі рівня його залучення за допомогою інструментів маркетингової комунікаційної політики.

Удосконалено науково-методичний підхід до оптимізаційного моделювання процесу просування зелених інновацій, в якому враховано такі показники як ефективність комунікаційної політики, розподіл витрат на

інструменти маркетингової політики комунікації, прогнозний рівень поведінкової реакції, рівень залучення і індекс реакції потенційних та фактичних стейкхолдерів залежно від типу зеленої інновацій.

## ВИСНОВКИ

1. Досліджено досвід ЄС щодо трансформації системи сталого сільськогосподарського землекористування на інноваційних засадах для забезпечення її стійкості та безпеки в умовах сучасних викликів та загроз (як фактичних, так і потенційних).

2. Розроблений склад органо-мінерального добрива на основі фосфатовмісної сировини, гуматів калію та кальцію і біочару.

3. Виконані дослідження фазового і хімічного складу та кристалічної структури складних добрив за допомогою спектрометрії і електронної мікроскопії різних типів, які дозволили визначити якість контакту оболонки до ядра гранули та її властивості.

4. Результати агрохімічних вегетаційних досліджень показали, що зелена маса зразків ячменю була вищою за контроль у зразку з капсульованою фосфатовмісним покриттям з гуматом кальцію і біочару більш ніж на 80 %, а також краща властивість досліджуваного зразка переносити посушливий період вегетації.

5. Розроблена методика проєктного розрахунку основного обладнання грануляційної установки з одержання капсульованих добрив та комп'ютерна програма розрахунку основного апарата - конструктивних параметрів тарілчастого гранулятора.

6. Досліджено і запропоновано перспективний варіант повноти використання вторинних енергетичних ресурсів при впровадженні рекупераційної системи із застосуванням циклу Майсоценко.

7. Розроблено теоретико-методологічний підхід до управління просуванням зелених інновацій на основі концепції сталого інноваційного випередження ґрунтується на методиках критеріальної оцінки ефективності каналів просування та оцінки рівня залучення споживачів шляхом моделювання споживчої поведінки у системі „рівень залучення—рівень реакції”.

8. Розроблено оптимізаційну модель просування зелених інновацій на основі форсайтингу поведінкової реакції стейкхолдерів, яка включає показники ефективності інструментів комплексу просування зелених інновацій, розподілу витрат підприємства між інструментами комплексу просування, що визначаються на основі прогностичних сценаріїв поведінкової реакції стейкхолдерів на зміну рівня їх залучення в результаті комунікаційного впливу.

## ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИДАННЯ

1. Балюк С. А., Носко Б. С., Воротинцева Л. І. Регулювання родючості ґрунтів та ефективності добрив в умовах змін клімату. *Вісник аграрної науки*. 2018. № 4. С. 5-12.
2. The European Green Deal. European Commission (2021) 18.05.2021. URL: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?qid=1596443911913&uri=CELEX:52019DC0640#document2>. Accessed.
3. Aznar-Sánchez, J. A., Piquer-Rodríguez, M., Velasco-Muñoz, J. F., Manzano-Agugliar, F. (2019). Worldwide research trends on sustainable land use in agriculture. *Land Use Policy*. Vol. 87. P. 104069. URL: <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2019.104069>
4. Балацкий О. Ф. Антология экономики чистой среды. Сумы: ИТД «Университетская книга». 2007. 272 с.
5. Omelyanenko, V., Kudrina, O., Semenikhina, O., Zihunov, V., Danilova, O., & Liskovetska, T. (2020). Conceptual aspects of modern innovation policy. *European Journal of Sustainable Development*. 9(2). P. 238. <https://doi.org/10.14207/ejsd.2020.v9n2p238>
6. Prokopenko, O.V., Rogkova, E.Yu. (2011). The modeling of the innovation market in the government stimulation system of its ecologization. *Marketing and Management of Innovations*. 3(1). pp. 91–98.
7. Tanashchuk, E.A., Kovtunenکو, K.V., Kovtunenکو, Yu.V. (2018). Theoretical and methodical principles of capital structure management in the innovation activity of telecommunication operators. *Journal of Automation and Information Sciences*. 50(3). P. 71–84.
8. Prokopenko, O., Shkola, V. (2014). Economic and organizational institutional grounds of the environmental management. *Marketing and Management of Innovations*. № 3. P. 197-205.

9. Shkola, V.Y., Domashenko, M.D., Kuchmiyov, A.V., Novak, K.S. (2016). Fundamentals of the Ukrainian land fund management. Marketing and Management of Innovations. №2. P. 235-345.

10. Земельний довідник України: 2020 інфографічний довідник. 16.06.2021. URL: [https://agropolit.com/storage/2020/Zemelnyy\\_dovidnyk\\_2020.pdf?utm\\_source=mailchimp&utm\\_campaign=0300ccc2e1f0&utm\\_medium=page](https://agropolit.com/storage/2020/Zemelnyy_dovidnyk_2020.pdf?utm_source=mailchimp&utm_campaign=0300ccc2e1f0&utm_medium=page)

11. Agricultural land (sq. km). The World Bank, 2018. 18.05.2021. URL: [https://data.worldbank.org/indicator/AG.LND.AGRI.K2?end=2018&name\\_desc=true&start=2013](https://data.worldbank.org/indicator/AG.LND.AGRI.K2?end=2018&name_desc=true&start=2013)

12. Agricultural land (% of land area). The World Bank, 2018. 18.05.2021. URL: [https://data.worldbank.org/indicator/AG.LND.AGRI.ZS?end=2018&name\\_desc=true&start=2013](https://data.worldbank.org/indicator/AG.LND.AGRI.ZS?end=2018&name_desc=true&start=2013)

13. Land area (sq. km). The World Bank, 2018. 18.05.2021. URL: [https://data.worldbank.org/indicator/AG.LND.TOTL.K2?end=2018&name\\_desc=true&start=2013](https://data.worldbank.org/indicator/AG.LND.TOTL.K2?end=2018&name_desc=true&start=2013)

14. Земельний кодекс України: Закон України від 25.10.2001. №2768-III. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2768-14#Text>

15. Про землеустрій: Закону України від 22.05.2003. №858-IV. URL: [https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/858-15?find=1&text=стале+землекористування#w1\\_1](https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/858-15?find=1&text=стале+землекористування#w1_1)

16. Сільське господарство України: Статистичний збірник за 2019 р. / Відп. за випуск О.Прокопенко. К.: Державна служба статистики України, 2020.

17. An action plan for the development of organic production. COM/2021/141 final/2. European Commission. 2021. URL: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX%3A52021DC0141R%2801%29>

18. Eurostat. European Commission Database. 18.05.2021. URL: <https://ec.europa.eu/eurosta>

19. A farm to fork strategy. European Commission, 2021. 18.05.2021. URL: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX:52020DC0381>
20. Motta, W.H., Issberner, L.-R., Prado, P. (2018). Life cycle assessment and eco-innovations: What kind of convergence is possible? *Journal of Cleaner Production*. 187. P. 1103-1114.
21. Shkola, V., Prokopenko, O., Stoyka, A., Nersesov, V., Sapiński, A. (2021). Green project assessment within the advanced innovative development concept. *Estudios de Economía Aplicada*. №39(5).  
URL: <http://ojs.ual.es/ojs/index.php/eea/article/view/5135>
22. Vakal, S., Yanovska, A., Vakal, V., Artyukhov, A., Shkola, V., Yarova, T., Dmitrikov, V. et al. (2021). Minimization of Soil Pollution as a Result of the Use of Encapsulated Mineral Fertilizers *Journal of Ecological Engineering*. 22(1). P. 221-230. <https://doi.org/10.12911/22998993/128965>
23. Vakal, S., Yanovska, A., Vakal, V., Artyukhov, A., Shkola, V. (2020). Investigation of Morphology and Composition of the Mineral Fertilizer Granules with Nanostructured Areas *Proceedings of the 2020 IEEE 10th International Conference on "Nanomaterials: Applications and Properties" NAP 2020*. 9309704
24. Yanovska, A., Artyukhov, A., Vakal, S., Vacal, V., Shkola, V. (2021). Encapsulated organic–mineral fertilizers with nanoporous structure. *Applied Nanoscience*. Vol.11, Issue 7. <https://doi.org/10.1007/s13204-021-01893-6>
25. Vakal V., Pavlenko I., Vakal S., Hurets L., Ochowiak M. (2020). Mathematical Modeling of Nutrient Release from Capsulated Fertilizers *Periodica Polytechnica Chemical Engineering*. 64(4). P. 562-568.
26. Majee S., Halder G., Mandal D.D., Tiwari O.N., Mandal T. (2021). Transforming wet blue leather and potato peel into an eco-friendly bio-organic NPK fertilizer for intensifying crop productivity and retrieving value-added recyclable chromium salts *Journal of Hazardous Materials*. 411. 125046. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2021.125046>

27. Використання добрив і пестицидів під урожай сільськогосподарських культур 2020 року. Державна служба статистики. 18.05.2021. URL: <http://www.ukrstat.gov.ua>

28. Використання добрив і пестицидів під урожай сільськогосподарських культур 2019 року. Державна служба статистики. 18.05.2021. URL: <http://www.ukrstat.gov.ua>

29. Вакал С.В., Вакал В.С., Артюхов А.Є., Яновська Г.О., Зеленський А.М., Школа В.Ю. Спосіб одержання рідкого гумату калію. Заявка № u202104731 від 18.08.2021 р.

30. Вакал С.В., Вакал В.С., Артюхов А.Є., Яновська Г.О., Зеленський А.М., Школа В.Ю. Спосіб одержання оболонки капсульованого добрива / МПК, C05D 1/02 (2006/01), патент на корисну модель №149798, патентовласник СумДУ, опубл. 08.12.2021. Бюл. № 49.

31. Звіт з НДР «Процес формування нових екологічно безпечних добрив пролонгованої дії на основі сировини фосфоритових родовищ». Розробка та створення дослідного устаткування вузла капсулювання, проведення випробувань. СумДУ, 2020. 78 с.

32. Гидротермальная карбонизация биомассы - путь к решению экологических проблем. Пропозиція – главный журнал по вопросам агробизнеса. 09.01.2020.

<https://propozitsiya.com/gidrotermalnaya-karbonizaciya-biomassy-put-k-resheniyu-ekologicheskikh-problem>

33. Теплотехніка та теплоенергетика : курс лекцій для студентів металургійних спеціальностей. Ч. 1. Теплотехніка / С.О. Коновалова, А.П. Авдєєнко. Краматорськ : ДДМА, 2009. 300 с.

34. Нащокин В.В. Техническая термодинамика и теплопередача, Учебник. Изд. 2-е, перераб. и доп. М.: Высшая Школа, 1975. С .458

35. Скрамтаев Б. Г. (гл. ред.) Справочник по производству строительной керамики.1962. Т 1, с.271.



36. Лебедев П. Д. Теплообменные, сушильные и холодильные установки. Учебник для студентов технических вузов. Изд. 2-е, перераб. М. : Энергия, 1972. 319 с.

37. Artyukhov A.E., Vakal S.V., Yanovska A.O., Shkola V.Y., Vakal V.S., Yarova T.Y. (2020). The Investigation of Nanoporous Structure Morphology and Elemental Composition of Organo-mineral Fertilizer Granules. *Journal of nano- and electronic physics*. Vol. 12 No 6, 06039 (5pp). [https://doi.org/10.21272/jnep.12\(6\).06039](https://doi.org/10.21272/jnep.12(6).06039)

38. Artem Artyukhov, Serhii Vakal, Viktoriia Shkola, Viktoriia Vakal and Anna Yanovska (2021). Obtaining of the Novel Organo-Mineral Fertilizers in Plate-like Granulators: Technological Bases of Process. *Advances in Design, Simulation and Manufacturing IV Proceedings of the 4<sup>th</sup> International Conference on Design, Simulation, Manufacturing: The Innovation Exchange, DSMIE-2021, June 8-11, 2021, Lviv, Ukraine – Volume Mechanical and Chemical Engineering* Editors: Ivanov, V., Pavlenko, I., Liaposhchenko, O., Machado, J., Edl, M. (Eds.) <https://www.springer.com/gp/book/9783030778224> P.207-217.

39. Yanovska, A., Vakal, S., Vakal, V., Shkola, V., Dychenko, T. and Artyukhov, A. (2021). "Influence of Shell's Organic Components on the Structure and Characteristics of Nanopores in Organic Mineral Fertilizers," 2021 IEEE 11<sup>th</sup> International Conference Nanomaterials: Applications & Properties (NAP), 2021, pp. 1-5, doi: 10.1109/NAP51885.2021.9568553.

40. Yanovska, A., Artyukhov, A., Vakal, S. et al. Encapsulated organic-mineral fertilizers with nanoporous structure. *Appl Nanosci* (2021). P. 1-9. <https://doi.org/10.1007/s13204-021-01893-6>.

41. Yanovska, G.O., Vakal, V.S., Artyukhov, A.E., Shkola, V.Y., Yarova, T.Y., Vakal, S.V. (2021) Nanoporous Organo-Mineral Fertilizers Obtained by Using of Granule Shell Technology. In: Fesenko O., Yatsenko L. (eds) *Nanomaterials and Nanocomposites, Nanostructure Surfaces, and Their Applications*. NANO 2020. Springer Proceedings in Physics, vol 263. Springer, Cham. p. 207-222. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-74741-1\\_14](https://doi.org/10.1007/978-3-030-74741-1_14).

42. Иваницкий В. В., Классен П. В., Новиков А. А. [и др.] Фосфогипс и его использование. М. : Химия, 1990. 224 с.
43. Проект нормативов предельно допустимых выбросов загрязняющих веществ в атмосферный воздух от стационарных источников ОАО «Сумыхимпром» / ОАО «Укрхимпроект». Сумы, 2000. 200 с.
44. Методика определения годового экономического эффекта от создания и внедрения новой техники, изобретений и рационализаторских предложений в химической промышленности / Мин. хим. пром. СССР. М., 1978. 117 с.
45. <https://ua.all.biz/karbamid-bgg1001272/> (дата звернення: 26.10.2021)
46. Вакал В. С., Гурец Л. Л. Расчет ожидаемого экологического эффекта при применении азотных удобрений с покрытием. *Сучасні технології у промисловому виробництві* : матеріали та програма V Всеукр. міжвуз. науково-техн. конференції. 17–20 квітня 2018 р. / редкол. : О. Г. Гусак, І. В. Павленко. Сумы : СумДУ, 2018. 326 с. С. 214.
47. T. Carole, P. Scheihing, L.S. Energy Efficiency and Use in the Chemical Industry. In Proceedings of the ACEEE proceedings. 2001. PP. 267–275.
48. J. J. Patt, W.F.B. Improving Energy Efficiency in the Chemical Industry. In Proceedings of the The Bridge. Energy efficiency. 2009. PP. 15–21.
49. S. Fawkes, K. Oung, D.T. Best Practices and Case Studies for Industrial Energy Efficiency Improvement. In Proceedings of the An Introduction for Policy Makers; 2016; p. 173.
50. Duroudier, J.-P.. Heat Transfer in the Chemical, Food and Pharmaceutical Industries. In Proceedings of the ISTE Press – Elsevier; 2017; p. 414.
51. Hipple, J. Chemical Engineering for Non-Chemical Engineers. In Proceedings of the John Wiley & Sons, Inc., Hoboken; 2017; p. 394.
52. Kapustenko, P.O.; Kukulka, D.J.; Arsenyeva, O.P. Intensification of heat transfer processes. *Chem. Eng. Trans.* 2015, 45, 1729–1734, doi:10.3303/CET1545289.

53. Matthias Beller; Thomas Böhland; Dana Demtröder; Johan Ebenhoech; Stefan Ernst; Johannes Ewers; Steffen Haber; Renate Hoer; Thomas Hirth; Dieter Jahn; et al. Change in the Raw Materials Base; Frankfurt, 2010.
54. Raw Material Base of the Chemical Industry. 2018.
55. Stahl, H.; Van Vaerenbergh, G. Single-Pot Processing. In Handbook of Pharmaceutical Granulation Technology, Second Edition; 2005; pp. 311–332 ISBN 9780849354953.
56. J. Litster, B.E. The Science and Engineering of Granulation Processes; Springer; 2004th Edition (March 31, 2004), 2004; ISBN ISBN 978-94-017-0546-2.
57. Stahl, H. Comparing Granulation Methods; GEA Pharma Systems: Hürth, 2010;
58. Muralidhar P., Bhargav E., S.C. Novel techniques of granulation: a review. *Int. Res. J. Pharmacy*. 2016, 7, 8–13.
59. H., S. Comparing Different Granulation Techniques. In *Pharmaceutical Technology*; Europe, 2004; pp. 22–33.
60. Sahoo, C.K.; Rao, S.R.M.; Sudhakar, M.; Bhaskar, J. Advances in granulation technology. *Res. J. Pharm. Technol.* 2016, 9, 571–580, doi:10.5958/0974-360X.2016.00108.6.
61. M.A., S. A technical note on granulation technology: a way to optimise granules. *Int. J. Pharm. Sci. Rev. Res.* 2013, 4, 55–67.
62. Artyukhov, A.Ye., Sklabinskiy, V.I. Experimental and industrial implementation of porous ammonium nitrate producing process in vortex granulators. *Nauk. Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu* 2013, 6, 42–48.
63. Artyukhov, A., Obodiak, V., Boiko, P., Rossi, P. Computer modeling of hydrodynamic and heat-mass transfer processes in the vortex type granulation devices. In *Proceedings of the CEUR Workshop Proceedings*; 2017; PP. 33–47.
64. Artyukhov, A.E., Artyukhova, N.O. Technology and the main technological equipment of the process to obtain  $N_4HNO_3$  with Nanoporous Structure. In *Proceedings of the Springer Proceedings in Physics*; 2019; PP. 585–594.

65. Artyukhov, A.E., Ivaniia, A.V. Obtaining porous ammonium nitrate in multistage and multifunctional vortex granulators. *Nauk. Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu* 2017, 7, 68–75.
66. Levchenko, D.; Yurko, I.; Artyukhov, A.; Baga, V. Maisotsenko cycle applications for multistage compressors cooling. *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.* 2017, 233, 012023, doi:10.1088/1757-899X/233/1/012023.
67. Levchenko, D.; Pavlenko, I.; Shulumei, A.; Ochowiak, M.; Manzharov, A. Parameter Identification of the Capillary Rising Process in Nanomaterials for Evaporative Cooling Applications. In; 2020; pp. 201–215.
68. Choi, C.-H.; Krishnan, S.; TeGrotenhuis, W.; Chang, C.-H. Capillary Rise of Nanostructured Microwicks. *Micromachines* 2018, 9, 153, doi:10.3390/mi9040153.
69. Artyukhova, N.O., Krmela, J. Nanoporous structure of the ammonium nitrate granules at the final drying: The effect of the dryer operation mode. *J. Nano-Electron. Phys.* 2019, 4.
70. Levchenko, D.O.; Artyukhov, A.E.; Yurko, I. V. Maisotsenko cycle applications in multi-stage ejector recycling module for chemical production. *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.* 2017, 233, 012024, doi:10.1088/1757-899X/233/1/012024.
71. Buyadgie, D.; Buyadgie, O.; Drakhnia, O.; Brodetsky, P.; Maisotsenko, V. Solar low-pressure turbo-ejector Maisotsenko cycle-based power system for electricity, heating, cooling and distillation. *Int. J. Low-Carbon Technol.* 2015, 10, 157–164, doi:10.1093/ijlct/ctv012.
72. Khalatov, A.A.; Severin, S.D.; Brodetsky, P.I.; Maisotsenko, V.S. Brayton's subatmospheric inverse cycle with regeneration of output heat by Maisotsenko's cycle. *Reports Natl. Acad. Sci. Ukr.* 2015, 72–79, doi:10.15407/dopovidi2015.01.072.
73. Mahmood, M.H.; Sultan, M.; Miyazaki, T.; Koyama, S.; Maisotsenko, V.S. Overview of the Maisotsenko cycle – A way towards dew point evaporative cooling. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 2016, 66, 537–555, doi:10.1016/j.rser.2016.08.022.
74. Kozlov Aleksandr, C.Y. US 20190277164A1 2019, 13.

75. В.М. Бродянский, В. Фратшер, К.М. Эксергетический метод и его приложения; Энергоатом.; Москва, 1988; ISBN 5-283-00152-0.
76. Morosuk, T.; Tsatsaronis, G. Advanced exergy-based methods used to understand and improve energy-conversion systems. *Energy* 2019, 169, 238–246, doi:10.1016/j.energy.2018.11.123.
77. Sayadi, S.; Tsatsaronis, G.; Morosuk, T.; Baranski, M.; Sangi, R.; Müller, D. Exergy-based control strategies for the efficient operation of building energy systems. *J. Clean. Prod.* 2019, 241, 118277, doi:10.1016/j.jclepro.2019.118277.
78. Athari, H.; Soltani, S.; Rosen, M.A.; Gavifekr, M.K.; Morosuk, T. Exergoeconomic study of gas turbine steam injection and combined power cycles using fog inlet cooling and biomass fuel. *Renew. Energy* 2016, 96, 715–726, doi:10.1016/j.renene.2016.05.010.
79. Fazelpour, F.; Morosuk, T. Exergoeconomic analysis of carbon dioxide transcritical refrigeration machines. *Int. J. Refrig.* 2014, 38, 128–139, doi:10.1016/j.ijrefrig.2013.09.016.
80. Jannatkah, J.; Najafi, B.; Ghaebi, H. Energy and exergy analysis of combined ORC – ERC system for biodiesel-fed diesel engine waste heat recovery. *Energy Convers. Manag.* 2020, 209, 112658, doi:10.1016/j.enconman.2020.112658.
81. Morosuk, T.; Tsatsaronis, G. A new approach to the exergy analysis of absorption refrigeration machines. *Energy* 2008, 33, 890–907, doi:10.1016/j.energy.2007.09.012.
82. Morosuk, T.; Tsatsaronis, G. Advanced exergy analysis for chemically reacting systems - Application to a simple open gas-turbine system. *Int. J. Thermodyn.* 2009, 12, 105–111, doi:10.5541/ijot.1034000245.
83. Morosuk, T.; Tsatsaronis, G. Splitting physical exergy: Theory and application. *Energy* 2019, 167, 698–707, doi:10.1016/j.energy.2018.10.090.
84. Shargut, Y., Exergy, R.P.; Energiia: Moscow, 1968;
85. Yuxhimenko, N.; Vakal, S. The exergy analysis of energy efficiency of the technology of granulated phosphorus-potassium fertilizers. *Eastern-European J. Enterp. Technol.* 2016, 5, 4–10, doi:10.15587/1729-4061.2016.77182.

86. European Commission. (2021). The European Green Deal. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?qid=1596443911913&uri=CELEX:52019DC0640#document2>.
87. Ян В. В. Продвижение. Система коммуникации между предпринимателями и рынком / В. В. Ян ; [пер.с польського]. Х. : Гуманитарный Центр, 2003. 480 с.
88. Попов Е. В. Продвижение товаров и услуг / Е. В. Попов. М.: Финансы и статистика, 1999. 320 с.
89. Коноплицкий В. А. Маркетинг, рынок, финансы: терминологический справочник / В. А. Коноплицкий, А. И. Филина. К. : Имэкс, 1992. 184 с.
90. Примак Т. О. Маркетингові комунікації : навч. посібник / Тетяна Олександрівна Примак. К.: Ельга, Ніка-Центр, 2003. 280 с.
91. Котлер Ф. Основы маркетинга / Филип Котлер, Гари Армстронг ; пер. с англ. [9-е изд.] М.: Издательский дом „Вильямс”, 2003. 1200 с.
92. Балабанова Л. В. Маркетинг: підручник / Л. В. Балабанова Донецьк : ТОВ „Юго-Восток Лтд”, 2002. 562 с.
93. Гаркавенко С. С. Маркетинг : підручник / Світлана Степанівна Гаркавенко. – К. : Лібра, 2004. 712 с.
94. Головкина Н. Интегровані маркетингові комунікації: методи оцінювання поведінки респондентів / Наталія Головкина // Маркетинг в Україні. 2007. № 4. С. 9-13.
95. Гольдштейн Г. Я. Маркетинг : учеб. пособ. / Г. Я. Гольдштейн, А. В. Катаев. Таганрог: Изд-во ТРТУ, 1999. 107 с.  
<http://www.aup.ru/books/m21/>
96. Маркетинг : підручник / [В. Руделіус, О.М. Азарян, О.А. Виноградов та ін.] ; під ред. О.І. Сидоренко, П.С. Редько. К. : Навчально-методичний центр «Консорціум із удосконалення менеджментн-освіти в Україні», 2005. 422 с.
97. Нойбауэр Х. Инновационная деятельность на малых и средних предприятиях / Херберт Нойбауэр // Проблемы теории и практики управления. 2002. № 3. С. 62-67.

98. Оснач О. Ф. Промисловий маркетинг : підруч. [для студ. вищ. навч. закл.] / О. Ф. Оснач, В. П. Пилипчук, Л. П. Коваленко. К. : Центр учбової літератури, 2009. 364 с.
99. Прокопенко О.В., Троян М.Ю. Оцінка рівня залучення організаційних споживачів у процес ухвалення рішення про покупку. Механізм регулювання економіки. 2009. №3. С. 70-81.
100. Божкова В.В., Мельник Ю.М. Реклама та стимулювання збуту : навч. посіб. [для студ. вищ. навч. закл.]. К. : Центр учбової літератури, 2009. 200 с.
101. Лук'янець Т. І. Рекламний менеджмент: навч. посіб. [2-ге вид., доп.]. К.: КНЕУ, 2003. 440 с.
102. Мелентьева Н.И., Бичун Ю.А. Маркетинговые коммуникации (теоретические и методические основы) : учебн. пособ. / под ред. проф. Г.Л. Багиева. СПб: СПбГУЭФ, 2001. 98 с.
103. Павленко А.Ф., Вовчак А.В., Примак Т.О. Маркетингові комунікації: сучасна теорія та практика : [монографія]. К. : КНЕУ, 2005. 408 с.
104. Прокопенко О.В., Троян М.Ю. Оцінка рівня залучення організаційних споживачів у процес ухвалення рішення про покупку. Механізм регулювання економіки. 2009. №3. С. 70-81.
105. Раєвнева Е.В., Тонєва К.В. Модель ефективного розподілу обсягу асигнувань на рекламу. Маркетинг в Україні. 2004. № 3. С.24 – 26.
106. Росситер Дж. Р., Перси Л. Реклама и продвижение товаров. СПб. : Питер, 2000. 463 с.
107. Смит П. Бэрри К., Пулфорд А. Коммуникации стратегического маркетинга / пер. с англ., под ред. Л.Ф. Никулина. М. : Юнити-Дана, 2001. 415с.
108. Школа В.Ю., Домашенко М.Д. Методологія управління екологічною безпекою економічної системи. Свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір, від 25.01.2019 №84847.
109. Ян В.В. Продвижение. Система коммуникации между предпринимателями и рынком / [пер.с польського]. Х. : Гуманитарный Центр, 2003. 480 с.

110. Belk, R. W., & A. Mitchell. Effects of Gift-Giving Involvement on Gift Selection Strategies. Association for Consumer Research. *Advances in Consumer Research*, 9. 1982. p. 408-412.
111. Bunn, M. D. Taxonomy of Buying Decision Approaches. *Journal of Marketing*, 1. 1993. p. 38-56.
112. Krugman, H. E. The impact of television advertising: Learning without involvement. *Public Opinion Quarterly*, 29. 1965. p. 349-356.
113. Krugman, H. E. The Measurement of Advertising Involvement. *Public Opinion Quarterly*, 30. 1966. p. 583-596.
114. Lavidge, R. J., & Steiner, G. A.. A Model for Predictive Measurements of Advertising Effectiveness. *Journal of Marketing*, 25. 1961. p. 59-64.
115. Ray, M. Marketing communication and the hierarchy-of-effects. Stanford University, Research Paper. 180.1973. p. 1-43.