

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
СУМСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

**ВАКАЛ Сергій Васильович**

УДК 502.13:504.5:631.4:661.632(043.3)

**НАУКОВО-ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ СТВОРЕННЯ НОВИХ ЕКОЛОГІЧНО  
БЕЗПЕЧНИХ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПРОЦЕСІВ ВИРОБНИЦТВ  
ФОСФОРОВМІСНИХ ДОБРИВ**

21.06.01 – екологічна безпека

Автореферат  
дисертації на здобуття  
наукового ступеня доктора технічних наук

Суми – 2018

**Дисертація є кваліфікаційною науковою працею на правах рукопису.**

Робота виконана в Сумському державному університеті Міністерства освіти і науки України.

**Науковий консультант –** Заслужений діяч науки і техніки України,  
доктор технічних наук, професор  
**Мальований Мирослав Степанович**  
Національний університет «Львівська політехніка»  
Міністерства освіти і науки України,  
завідувач кафедри екології та збалансованого  
природокористування, м. Львів

**Офіційні опоненти:** доктор технічних наук, професор  
**Гомеля Микола Дмитрович**  
Національний технічний університет України  
«Київський політехнічний інститут ім. Ігоря  
Сікорського» Міністерства освіти і науки України,  
завідувач кафедри екології та технології рослинних  
полімерів, м. Київ

доктор технічних наук, професор  
**Мандрик Олег Миколайович**  
Івано-Франківський національний технічний  
університет нафти і газу Міністерства освіти  
і науки України, проректор з науково-  
педагогічної роботи, м. Івано-Франківськ

доктор технічних наук, професор  
**Внукова Наталія Володимирівна**  
Харківський національний автомобільно-дорожній  
університет Міністерства освіти і науки України,  
завідувач кафедри екології, м. Харків

Захист дисертації відбудеться «16» лютого 2018 р. о 13 год 00 хв на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 55.051.04 в Сумському державному університеті за адресою: 40007, м. Суми, вул. Римського-Корсакова, 2, корп. Ц, ауд.204.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Сумського державного університету за адресою: 40007, м. Суми, вул. Римського-Корсакова, 2.

Автореферат розісланий «15» січня 2018 року.

Учений секретар  
спеціалізованої вченої ради Д 55.051.04



І. Ю. Аблєєва

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Актуальність роботи.** Однією з найважливіших проблем національної безпеки та сталого розвитку кожної держави, в тому числі й України, є підвищення рівня її екологічної безпеки. Обов'язковою умовою екологізації виробництва, зокрема сільськогосподарського, є еволюційний перехід до прогресивної системи біосферозахисного природо- та землекористування, адаптованого до умов навколишнього середовища. На території України впродовж багатьох років діють потужні чинники забруднення довкілля та нераціонального природокористування, що зумовлене багатьма причинами і насамперед тим, що на населення України, яке становить всього 1 % від населення Землі, припадає близько 5 % загальносвітового видобутку і переробки мінеральних ресурсів. Низький рівень екологічності й досконалості технологій переробки мінеральної сировини, зокрема виробництва добрив, та неефективне їх застосування призводить до стрімкого зростання техногенного навантаження на довкілля, що характеризується, насамперед, забрудненням природних компонентів середовища та посиленням процесів деградації ґрунтів.

Водночас, у зв'язку з неможливістю поставок на вітчизняні підприємства з виробництва мінеральних добрив екологічно безпечної закордонної фосфатної сировини з умістом  $P_2O_5$  – 39 %, постала нагальна потреба залучення сировини з інших родовищ і визначення меж їх екологічно безпечного застосування. Хоча за останні десятиліття на світовому ринку з'явилося багато видів фосфатної сировини з умістом  $P_2O_5$  24 % – 32 %, але питання їх екологічної безпеки при переробці та визначення рівня токсичності добрив на їх основі ще остаточно не вирішені.

Перспективність використання фосфоритових концентратів у технологічних процесах одержання мінеральних добрив зумовлена їх доступністю в кількісному та якісному плані, вмістом у їх складі значної кількості засвоюваного  $P_2O_5$  і домішок, які можна розглядати як модифікуючі оліго- та мікроелементи добрив. Водночас дослідна переробка фосфоритових концентратів на підприємствах галузі з виробництва мінеральних добрив показала значне підвищення енергоспоживання та рівня пилового забруднення робочих зон і газових викидів виробництва, потребувала зміни режимів розкладання фосфоритів і витратних норм та визначила втрати дисперсної сировини при транспортуванні. Тому постала нагальна потреба розроблення сучасних екологічно безпечних технологій і апаратурного обладнання перероблення фосфатної сировини в екологічно безпечні добрива.

Зважаючи на зміну якісних показників фосфатної сировини і зниження  $P_2O_5$  заг при відтворенні відомих марок добрив, потрібне встановлення допустимого вмісту важких металів у туках. Перспективним напрямком підвищення екологічної безпеки за умови вмісту у добривах важких металів, арсену і радіонуклідів необхідно вважати модифікування їх органічними добавками, що дозволить мінімізувати екологічну небезпеку від забруднення довкілля токсикантами за рахунок їх зв'язування у нерозчинні комплекси. З цією метою передбачається залучення в якості органічної складової добрив бурого вугілля, торфу, сапропелю тощо. Ця сировина має високий вміст гумінових речовин, що дозволяє при введенні її до складу добрив істотно покращити поживні властивості туків і поліпшити екологічну складову агротехнологій.

Водночас ефективно впровадження у виробництво фосфоритів вітчизняних родовищ, Північної Африки і Близького Сходу потребує створення сучасного, екологічно безпечного підходу, який забезпечить сталий розвиток галузі за екологічно безпечними технологіями та проведення повного циклу державних випробувань із визначенням екологічно безпечних параметрів токсиколого-гігієнічних показників сировини й добрив і ґрунтового вивчення агрохімічних характеристик добрив.

На основі вищенаведеного можна стверджувати, що дослідження, спрямовані на створення екологобезпечної, матеріало- та енергоощадної технології виробництва та застосування мінеральних і органо-мінеральних добрив (ОМД) на основі фосфатної та гумусової сировини є актуальними і дають можливість вирішення важливої екологічної проблеми – створення засад збалансованого екологічно безпечного природокористування, що дозволить мінімізувати рівень техногенного навантаження на довкілля за рахунок зниження забруднення атмосфери, літосфери та гідросфери токсичними елементами.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** Тематика дисертаційної роботи відповідає пріоритетним напрямкам розвитку науки і техніки в Україні на період до 2020 р. з розділу «Раціональне природокористування» і стратегічним пріоритетним напрямкам інноваційної діяльності в Україні на 2011–2021 рр. «Широке застосування технологій більш чистого виробництва та охорони навколишнього природного середовища» і науковому напрямку кафедри прикладної екології Сумського державного університету, пов'язаного з державними тематиками «Зниження техногенного навантаження на навколишнє середовище підприємств хімічної та машинобудівної промисловості» № держреєстрації 0109U008929 (2009–2012 рр.), «Розробка шляхів поліпшення екологічної ситуації міст і промислових зон» № держреєстрації 0111U006335 (2011–2016 рр.), «Зниження техногенного навантаження на навколишнє середовище підприємств хімічної, машинобудівної промисловості та теплоенергетики» № держреєстрації 0116U006606 (2016–2020 рр.), у яких здобувач був виконавцем окремих етапів, та науково-дослідних робіт ДП «Сумський науково-дослідний інститут мінеральних добрив і пігментів», у яких здобувач був керівником.

**Мета і завдання дослідження.** Метою роботи є розроблення науково-методологічних основ екологічно безпечних енергоефективних технологій виробництва та застосування мінеральних і органо-мінеральних фосфоровмісних добрив на основі фосфатної та гумусової сировини.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі завдання:

– провести оцінювання екологічної небезпеки забруднення довкілля важкими металами, арсеном і радіонуклідами, визначити перспективу й умови застосування вітчизняної і закордонної фосфатної сировини у виробництві мінеральних добрив та проаналізувати існуючі теоретичні моделі розкладання фосфатів сульфатною кислотою;

– визначити наукові й технологічні засади раціонального екологічно безпечного перероблення закордонних і вітчизняних фосфатів з обґрунтуванням умов виробництва екстракційної фосфатної кислоти (ЕФК), простих фосфоровмісних і NPK-добрив різного складу;

- розробити теоретичні засади моделювання екологічно безпечних процесів розкладання фосфоритів сульфатною кислотою і запропонувати математичну модель процесу розкладання для визначення лімітуючої стадії процесу;

- дослідити аспекти використання безпечного розкладання фосфоритів у промислових умовах для одержання простих і складних мінеральних добрив та запропонувати принципові екологічно-безпечні технологічні схеми процесу;

- провести порівняльний ексергетичний аналіз кислотних і безкислотних технологій одержання фосфоровмісних добрив для мінімізації екологічної небезпеки і кількості викидів та аналізу використання тепла процесу при виробництві добрив;

- обґрунтувати ефективність екологічно безпечної технології одержання гумату натрію з подальшим його застосуванням у виробництві ОМД;

- виконати агроекологічні та екологічні дослідження для розроблення нормативно-технічної документації і проведення державної реєстрації нових видів добрив в Україні;

- визначити еколого-енерго-економічний ефект від одержання та застосування нових видів добрив.

**Об'єкт дослідження** – вплив технологічних процесів виробництва фосфоровмісних добрив на стан навколишнього середовища.

**Предмет дослідження** – екологічно безпечні процеси перероблення фосфатної сировини українських та закордонних родовищ з одержанням нових видів екологічно безпечних мінеральних і органо-мінеральних добрив.

**Методи дослідження** базуються на системному аналізі теоретичних досліджень, фізичному і математичному моделюванні та прогнозуванні. Проведені системні дослідження нових екологічно безпечних технологій виробництва і застосування фосфоровмісних добрив, експериментальні рентгеноскопічні, електронно-мікроскопічні і фізико-хімічні дослідження вихідної фосфатної і гумусової сировини та готової продукції, лабораторні дослідження визначених рецептур складу фосфоровмісних добрив і технологій їх одержання, напівпромислові та промислові випробування розроблених технологій, що забезпечують раціональне використання природних ресурсів та дотримання форматів запобігання шкідливому впливу на довкілля. У роботі використано методи постановки і планування експерименту, математичного моделювання, статистичного оброблення та експериментальних даних із використанням прикладних комп'ютерних програм (Excel, Statistica 7.0, Origin 8.0).

#### **Наукова новизна одержаних результатів:**

- уперше розроблено науково-теоретичні основи створення нових екологічно безпечних технологічних процесів виробництв фосфоровмісних добрив, що дозволило запропонувати комплекс організаційно-технологічних енерго-ефективних заходів щодо забезпечення екологічної безпеки виробництва та застосування нових типів фосфоровмісних добрив;

- уперше розроблено наукові та технологічні засади раціональної екологічно безпечної переробки закордонних і вітчизняних фосфатів з обґрунтуванням умов виробництва екстракційної фосфатної кислоти, простих фосфоровмісних, азотно-фосфорних, фосфорно-калійних і азотно-фосфорно-калійних добрив різного складу,

що дозволило забезпечити екологічну безпеку промислових технологій та агротехнологій;

- уперше визначено, що безпечність фосфатної сировини для перероблення на вітчизняних підприємствах визначається за вмістом кадмію, плюмбуму, арсену, ефективною питомою активністю природних радіонуклідів та граничними нормами їх застосування, що дозволило забезпечити науково обґрунтований рівень екологічної безпеки при застосуванні вироблених із неї добрив;

- удосконалено науковий підхід до процесів модифікування фосфоровмісних добрив гуматами лужних металів на основі вітчизняної сировини і встановлено оптимальні умови реалізації цього процесу, що дозволило обґрунтувати екологічні умови функціонування агросистем із завданням збереження здоров'я людини;

- удосконалено теоретичні засади моделювання процесів розкладання фосфоритів сульфатною кислотою і запропонована математична модель процесу розкладання для визначення лімітуючої стадії процесу, що дозволило забезпечити оптимальну форму управління екологічною безпекою при виробництві нових видів добрив;

- дістали подальшого розвитку способи модифікування мінеральних добрив органічними добавками, що відповідає вимогам забезпечення сталого соціально-економічного розвитку та потенціалу держави.

### **Практичне значення одержаних результатів**

1. Теоретичні обґрунтування результатів експериментальних досліджень стали науковою основою створення нових екологічно безпечних технологічних процесів, що забезпечують раціональне використання природних ресурсів, додержання нормативів шкідливих впливів на довкілля. Експериментально досліджені та визначені екологічно безпечні вітчизняні родовища фосфатів, фосфоритів Близького Сходу та Північної Африки, які за своїми властивостями дозволені для перероблення в Україні на екологічно безпечні добрива. Аналіз даних експериментальних та дослідно-промислових випробувань дозволив розробити і впровадити у виробництво на ПАТ «Суміхімпром» нові технології отримання амонізованого суперфосфату, адаптовані до вихідної сировини на основі закордонних фосфоритів, та одержання складних азотно-фосфорно-калійних добрив, які базуються на екстракційній фосфатній кислоті, одержаній із закордонних фосфоритів, що підтверджено відповідними актами (акти впровадження від 10.11.2006 р, 03.10.2014 р., 17.12.2014 р., 02.07.2015 р., 06.02.2017 р.,) та в ТОВ «Компанія Неоком» (акт впровадження від 12.12.2016 р.). Фактичний економічний ефект від упровадження у виробництво нової технології екологічно безпечних добрив на основі закордонних фосфоритів становить 43,74 млн грн, що підтверджується відповідним документом (акт за 2002–2008 рр.).

2. Розроблена і запропонована до впровадження у виробництво екологічно безпечна технологія одержання нових видів гранульованих органо-мінеральних добрив шляхом модифікації фосфатного борошна гуматами лужних металів.

3. Проведене порівняння ексергетичних витрат виробництв амонізованого суперфосфату потоковим методом і фосфорно-калійних добрив безкислотним методом показало, що теплове забруднення довкілля у виробництві РК-добрив зменшуються на 70 % у порівнянні з виробництвом амонізованого суперфосфату, а

зменшення викидів парникового газу становить  $2,85 \cdot 10^3 \text{ м}^3$  у перерахунку на 1 тону добрива, що може сприяти обґрунтуванню ступеня відповідності наявних, або прогнозованих екологічних умов навколишнього середовища з метою збереження і відновлення.

4. Агрохімічними дослідженнями зразків амонізованого суперфосфату, амофосу та складних NPK-добрив на дослідних полях Інституту ґрунтознавства та агрохімії ім. О. Н. Соколовського НААН України встановлено, що застосування нових видів добрив підвищує врожайність сільськогосподарських культур на 30–65 % та одночасно покращує їх якість.

5. Визначення біоенергетичної ефективності застосування розроблених добрив у вирощуванні технічних культур із завданням збереження здоров'я людини за рахунок зменшення техногенного впливу на навколишнє середовище під час виробництва добрив в Україні показало істотне зменшення витрат у повному господарському циклі, що дозволяє одержати очікуваний економічний ефект 4,45 млрд грн за 1 рік порівняно з традиційними агрохімічними технологіями.

6. Проведений комплекс робіт із державних випробувань нових видів добрив на основі фосфатної сировини закордонних родовищ дозволив організувати удосконалення наявних і створити нове виробництво екологічно безпечних добрив за екологічно безпечними технологіями, що забезпечують оптимальні форми управління екологічною безпекою виробництва.

7. Практична реалізація одержаних результатів у дисертаційній роботі полягає у використанні їх у тематичних розробках ДП «Сумський державний науково-дослідний інститут мінеральних добрив і пігментів» та в навчальному процесі Сумського державного університету при викладанні дисциплін «Техноекологія» та «Промислова екологія» (акт впровадження від 05.09.2016 р.).

**Особистий внесок здобувача** полягає в аналізі стану проблеми, формуванні й розробленні ідеї та теми дисертації, та наукових положень концепції виробництва і застосування в сільському господарстві екологічно безпечних добрив, формулюванні мети роботи, розробленні математичних моделей, установленні теоретичних залежностей, створенні лабораторних стендів для проведення досліджень процесу розкладання фосфатної сировини сульфатною кислотою, кінетики процесу одержання амофосу та інших складних мінеральних і органо-мінеральних добрив, участі у постановці і проведенні експериментальних досліджень та промислових випробувань, в аналізі та узагальненні результатів, формулюванні новизни, висновків та основних положень роботи, які виносяться на захист.

Обговорення, аналіз та узагальнення результатів досліджень, розроблення концепцій виробництва і застосування в сільському господарстві екологічно безпечних добрив проведено спільно з науковим консультантом – заслуженим діячем науки і техніки України, доктором технічних наук, проф. М. С. Мальованим.

**Апробація результатів дисертації.** Основні положення дисертації доповідалися на: X міжнародній конференції «Вдосконалення процесів та апаратів хімічних та харчових виробництв» ІССЕ-99, м. Львів, 1999; Дев'ятій науковій конференції «Львівські хімічні читання 2003», м. Львів, 2003; VIII Міжнародній науково-практичній конференції «Проблеми управління якістю підготовки фахівців-

екологів у світлі інтеграції освіти України в європейський простір та перспективні природоохоронні технології, м. Львів, 2003; XI міжнародній науково-технічній конференція «Экология и здоровье человека. Охрана водного и воздушного бассейнов. Утилизация отходов», м. Бердянск, 2003; Науково-технічній конференції викладачів, співробітників, аспірантів і студентів інженерного факультету Сумського державного університету, м. Суми, 2003; Міжнародній науково-практичній конференції «Комплексне використання сировини, енерго- та ресурсозберігаючі технології у виробництві неорганічних речовин», м. Черкаси, 2004; XIII Міжнародній науково-технічній конференції «Экология и здоровье человека. Охрана водного и воздушного бассейнов. Утилизация отходов», м. Харьков, 2005; Міжнародній науково-практичній конференції «Екологічна безпека: проблеми і шляхи вирішення», м. Алушта, 2006; III Українській науково-технічній конференції з технології неорганічних речовин «Сучасні проблеми технології неорганічних речовин», м. Дніпропетровськ, 2006; Міжнародній конференції «Гуминовые кислоты и фитогормоны в растениеводстве», м. Київ, 2007; III Міжнародній науково-практичній конференції «Екологічна безпека: проблеми і шляхи вирішення», м. Алушта, 2007; 5 Міжнародній конференції – Green 5 «Construction for a sustainable environment», Vilnius, Lithuania; IV Українській науково-технічній конференції з технології неорганічних речовин «Сучасні проблеми технології неорганічних речовин», м. Дніпродзержинськ, 2008; Міжнародній науково-технічній конференції «Сучасні проблеми нано-, енерго- та ресурсозберігаючих і екологічно орієнтованих хімічних технологій», м. Харків, 2010; Міжнародній науково-практичній конференції «Екологічна безпека: проблеми і шляхи вирішення», м. Алушта, 2011; IV Міжнародній науково-практичній конференції «Актуальные проблемы экологии и охраны труда», м. Курськ, 2012; Міжнародній конференції «Modern Challenges and Decisions of Globalization», New York, USA, 2013.

**Публікації.** За результатами дисертаційної роботи було опубліковано 50 наукових праць, з яких: 3 монографії – у співавторстві; 22 статті – у наукових фахових виданнях з переліку МОН України, 7 статей – у виданнях, що індексуються наукометричними базами даних, та періодичних наукових виданнях інших держав, 3 статті – в інших виданнях, 9 тез доповідей у збірниках праць конференцій, 3 деклараційні патенти України; 3 патенти на корисні моделі.

**Структура дисертації.** Дисертація складається із вступу, семи розділів, висновків, списку джерел літератури, який містить 262 найменування на 27 сторінках та 14 додатків на 70 сторінках.

Повний обсяг дисертації становить 422 сторінок, робота містить 52 рисунка та 97 таблиць.

## ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** обґрунтована актуальність роботи, визначено зв'язок із науковими програмами, темами, планами, визначено мету і завдання досліджень, сформульовано наукову новизну та практичне значення одержаних результатів, особистий внесок автора та апробацію результатів роботи.



У **першому розділі** зроблено аналіз стану екологічної безпеки українських ґрунтів, який тісно пов'язаний із родючістю та фактичним забезпеченням їх добривами. Визначено, що погіршення екологічної ситуації в Україні, посилення процесів деградації ґрунтів, проблеми з енерговитратним виробництвом безпечних для здоров'я населення продуктів харчування зумовлюють необхідність зміни сучасної стратегії забезпечення мінеральними добривами перш за все у зв'язку з потужними чинниками забруднення довкілля, якими є техногенний (відходи і викиди промисловості і автотранспорту) та агрогенний, внаслідок використання добрив.

Комплексний підхід до розроблення екологічно-безпечних добрив ґрунтується на безпеці їх виробництва і застосування. Проведено аналіз основних технологій перероблення природних фосфатів. Показано екологічну й технологічну доцільність застосування тонкодисперсного подрібнення вихідної фосфатної сировини з умістом  $P_2O_5$  заг не більше ніж 24 % та показником  $P_2O_5$  засв не менше ніж 80 %.

Представлено огляд асортименту фосфатно-тукової продукції України і визначені напрямки його розширення за рахунок розробки нових видів мінеральних добрив та створення органо-мінеральних композицій. Показано, що органо-мінеральні комплекси можуть зв'язувати важкі метали у нерозчинні сполуки, що дозволяє підвищити рівень екологічної безпеки промислових технологій та агротехнологій. Водночас потребує визначення кількості найбільш токсичних для фосфатної сировини металів, що є критичними для їх безпечного застосування та граничні норми їх умісту в добривах із наступним підтвердженням екологічної безпеки виробництва і застосування під час проведення державних випробувань розроблених марок добрив.

Проведений аналіз дозволив висвітлити наукове значення та сформулювати завдання і основні етапи досліджень.

У **другому розділі** дисертаційної роботи розглянуті об'єкт та методи дослідження. Наведена розроблена стратегія нових екологічно безпечних технологій фосфоровмісних добрив, що забезпечує раціональне використання природних ресурсів, а також дотримання форматів запобігання шкідливому впливу на довкілля та життєдіяльність людини, яку можна розділити на чотири етапи:

1. Визначення стану забезпечення ґрунтів фосфором та формулювання вимог до нових екологобезпечних технологій виробництва фосфоровмісних добрив.
2. Аналіз можливої екологічно безпечної фосфатної сировини і визначення принципів технологій її переробки.
3. Дослідження агроекологічних характеристик розроблених екологічно безпечних добрив під час проведення їх державних випробувань.
4. Промислова реалізація виробництва нових видів добрив із визначенням дотримання форматів запобігання шкідливому впливу на довкілля та розрахунку еколого-енерго-економічного ефекту одержання та застосування екологічно безпечних добрив (рис. 1).

На першому етапі, ґрунтуючись на висновках розділу 1, сформульовані завдання досліджень щодо екологобезпечних технологій виробництва і застосування фосфоровмісних добрив. На другому етапі проведено експериментальні дослідження з оцінювання мінералогічного та хімічного складу, фізико-хімічних

властивостей, токсиколого-екологічних та споживчих властивостей фосфатної сировини України, Близького Сходу і Північної Африки.

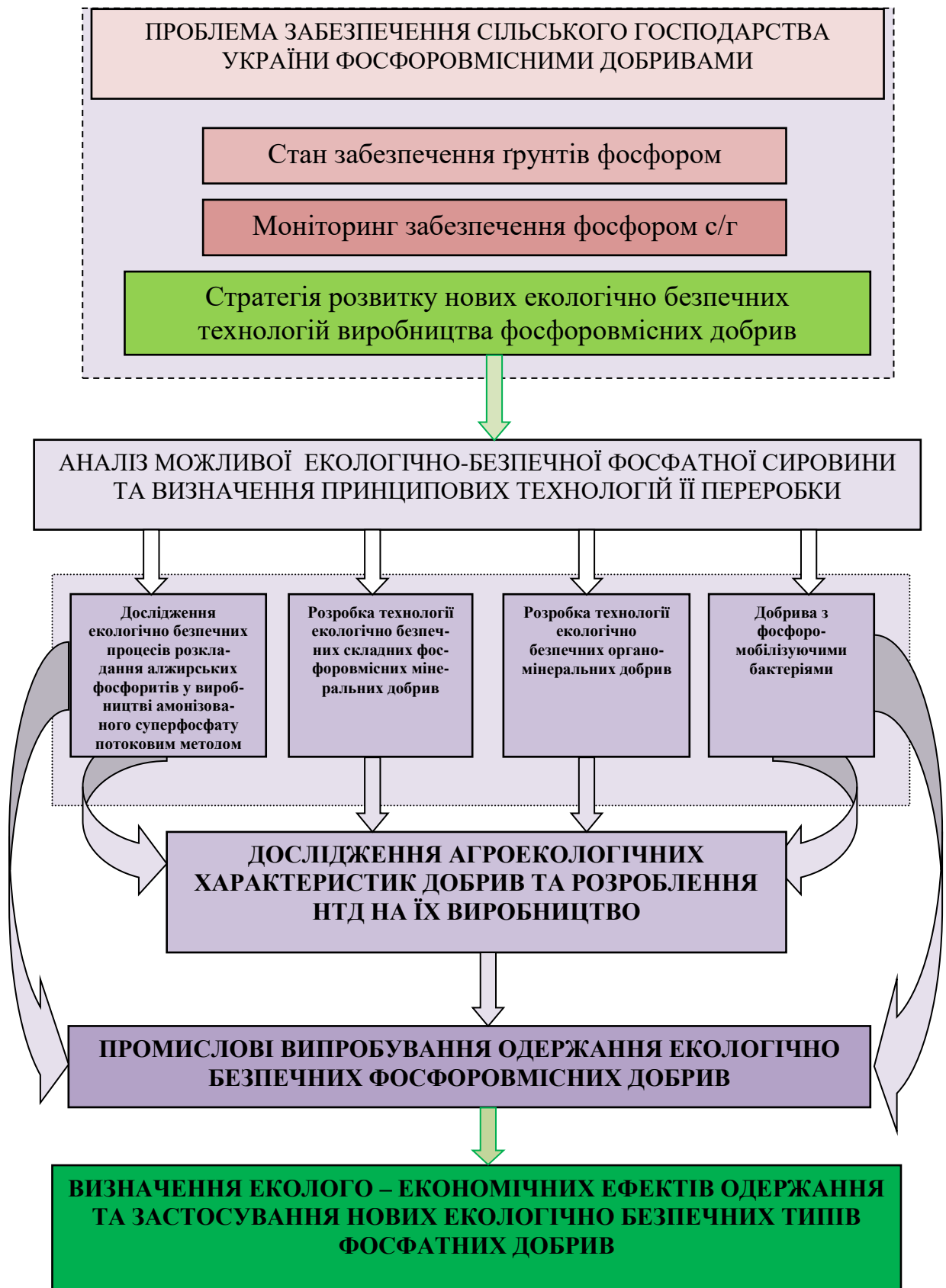


Рисунок 1 – Науково-теоретичні основи стратегії розвитку екологічно безпечних технологій виробництва і застосування фосфоровмісних добрив

Визначено якісний склад апатитів вітчизняних родовищ, який дозволяє переробляти їх без обмежень за сульфатною технологією. Вміст в апатитових концентратах вітчизняних родовищ таких токсичних елементів, як Cd, Pb, As та питома активність природних радіонуклідів не перевищує сучасних вимог Європейської економічної асоціації до добрив, які можуть бути отримані на їх основі. Хімічний склад зразків апатитового концентрату наведено в таблиці 1.

Таблиця 1 – Хімічний склад апатитового концентрату Федорівського, Носачівського та Кропивнянського родовищ

Найменування показника та одиниця виміру	Вміст компонентів у зразках фосфатів		
	Федорівський	Носачівський	Кропивнянський
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> заг, %	39,1	39,6	39,65-39,9
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> засв, %	5,1	5,3	6,56
Sr, %	0,008	0,0074	0,0078
F, %	3,05	3,13	2,95
H <sub>2</sub> O, %	0,1	0,2	0,3
As, мг/кг	0,6	0,2	3,7
Cd, мг/кг	менше 1	менше 1	менше 0,5
Pb, мг/кг	7,8	менше 5	2,4
Питома активність природних радіонуклідів, Бк/кг	157	143	36

Іншим видом фосфатної сировини є вітчизняні фосфорити жовтого, зернистого та змішаного типу. Електронно-мікроскопічні дослідження зразка зернистого фосфориту Ново-Амвросіївського родовища показують, що фосфорит складається з полідисперсних частинок, які мають різні форми та поверхню, а характер їх профілю поверхні дозволяє прогнозувати подібні до закордонних технологічні режими їх перероблення (рис. 2).

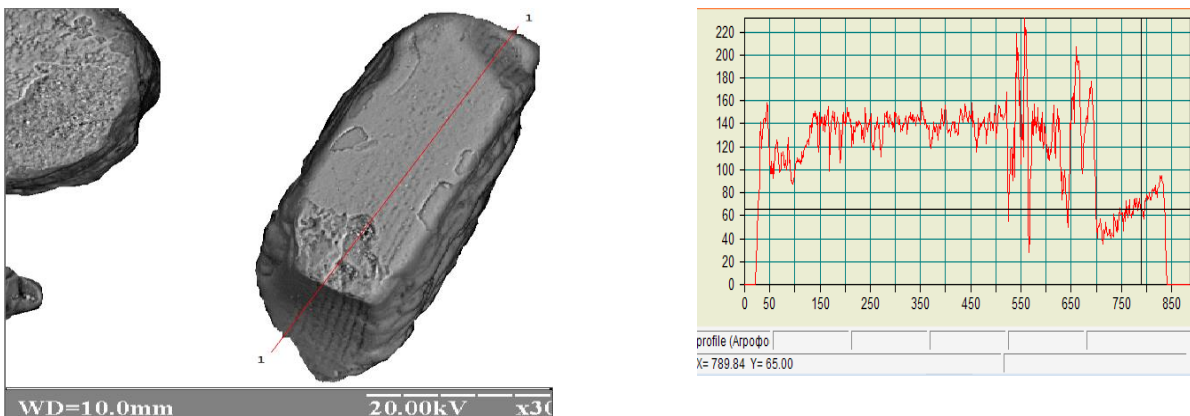
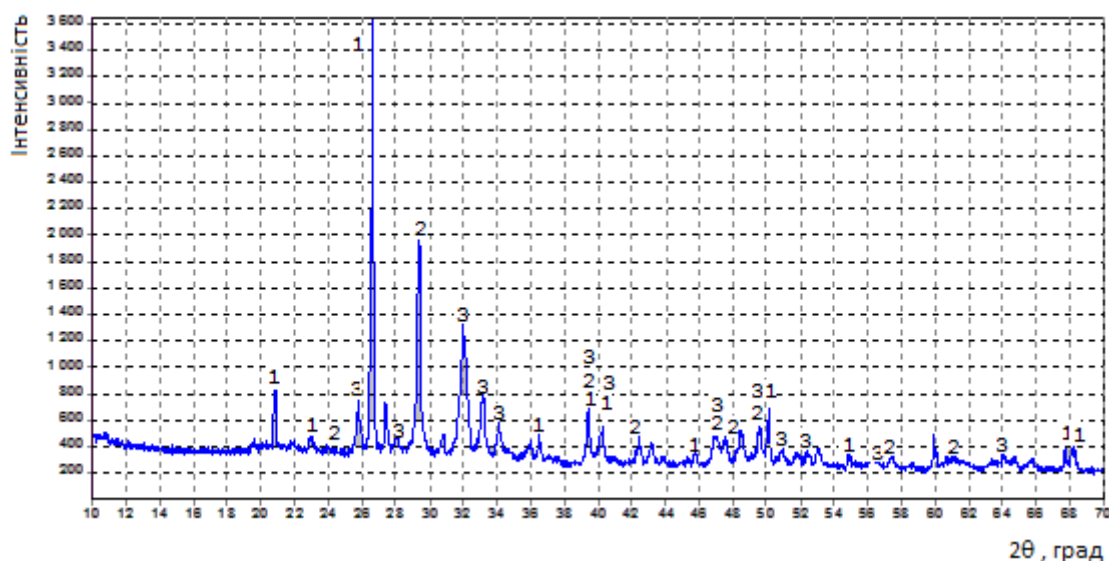


Рисунок 2 – Результати електронно-мікроскопічних досліджень Ново-Амвросіївського фосфориту

Результати мінералогічних досліджень зразка Ново-Амвросіївського фосфоритового концентрату показують, що основною кристалічною фазою цього фосфориту є флуорапатит  $\text{Ca}_5\text{F}(\text{PO}_4)_3$  у кристалоаморфній формі, мінерал також містить домішки доломіту  $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$  та кварцу (рис.3).



Поч.кут=10; Кін.кут=70; Шаг=0.02; Експоз.=2.0; Швидкість=1; Іntenс.=6584;  
Основні фази: 1 –  $\text{SiO}_2$  – Silicon Oxide; 2 –  $\text{CaCO}_3$  – Calcite; 3 –  $\text{Ca}_5\text{F}(\text{PO}_4)_3$  – Fluorapatite

Рисунок 3 – Рентгенограма Ново-Амвросіївського фосфориту

Хімічний аналіз цих фосфоритів показує, що концентрат містить крім фосфату ще й калій у складі глауконіту, а за показниками вмісту екологічно нормованих кадмію, плюмбуму, арсену й ефективної питомої активності природних радіонуклідів, цей концентрат необхідно вважати одним з екологічно безпечних видів сировини. Результати хімічного аналізу фосфат-глауконітового концентрату наведено в таблиці 2.

Таблиця 2 – Фізико-хімічні показники фосфат-глауконітового концентрату

Найменування показника та одиниця виміру	Результат аналізу
Масова частка загальних фосфатів (сума швидко та повільно діючих форм $\text{P}_2\text{O}_5$ ), %, не менше	19,7
Масова частка засвоюваних фосфатів у перерахунку на $\text{P}_2\text{O}_5$ , %, не менше	16,48
Масова частка загального калію в перерахунку на $\text{K}_2\text{O}$ , %, не менше	2,2
Масова частка води, %, не більше	0,62
Масова частка кадмію, мг/кг, не більше	4
Масова частка плюмбуму, мг/кг, не більше	2
Масова частка арсену, мг/кг, не більше	1
Ефективна питома активність природних радіонуклідів, Бк/кг, не більше	370

На теперішній час фосфорити Близького Сходу і Північної Африки є практично єдиною альтернативною фосфоровмісною сировиною вітчизняних підприємств з виробництва мінеральних добрив. Як об'єкти досліджень розглядалися закордонні фосфорити таких країн: Алжиру, Сирії, Тунісу, Марокко, які є основними постачальниками сировини на світовому ринку (табл. 3).

Таблиця 3 – Хімічний склад фосфоритів країн середземноморського регіону

Найменування показника	Сирія	Алжир	Туніс	Марокко
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> заг, %	29,1-30,6	28,8-29,5	29,3	31,9
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> засв, %	20-22	23,1-26,8	27,5	23,4
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> л.р., %	20,4-21,9	-	11,4	-
CaO, %	43,7-49,1	45,2-49,4	47,4	53,9
MgO, %	0,3-0,6	1,4-1,18	0,4-0,55	0,47
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , %	0,1-0,5	0,3-0,4	0,11	0,3
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , %	-	0,3-0,4	0,5	0,3
SiO <sub>2</sub> , %	2,0	2,2-3,8	3,7	2,4
F, %	3,6	3,3-3,7	3,5	3,8
SO <sub>3</sub> , %	0,34-0,63	-	0,53	0,38
CO <sub>2</sub> , %	6,7	6,5-7,8	5,9	7,2
Cl <sub>в.р.</sub> , %	0,07-0,24	0,05-0,18	0,07	0,03
Na <sub>2</sub> O, %	0,68-0,96	0,2-0,6	1,57	0,74
K <sub>2</sub> O, %	0,004-0,006	0,01-0,2	0,055	0,02
Sr, %	0,19	0,18-0,28	3,1·10 <sup>-3</sup>	42,2·10 <sup>-3</sup>
Mn, %, 10 <sup>-4</sup>	6,5	3	1,8	18,7
Co, %, 10 <sup>-4</sup>	8	11	0,9	9,4
Ni, %, 10 <sup>-4</sup>	60,5	28	1,8	47,7
Zn, %, 10 <sup>-4</sup>	34	150	0,02	286
Hg, %, 10 <sup>-4</sup>	-	0,04	0,13	0,007
Cu, %, 10 <sup>-4</sup>	29	15	8,4	40,5
Cd, мг/кг	12	17	22	18,9
Pb, мг/кг	3,5	6	2	3,0
As, мг/кг	10	10	3,9	14
Природна радіоактивність	518,2	752	277-350	1159–1605

Загальноприйнятими основними показниками якості фосфатної сировини є вміст корисної речовини – фосфору в перерахунку на P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, CaO і сполук полуторних оксидів. Як показують дані таблиць 2 і 3, частка засвоєваної форми апатиту становить 11 %, а фосфоритів – від 61 % до 93,8 % в залежності від родовища та дисперсності сировини. Глибина метаморфізму може бути оцінена часткою засвоєваної форми P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> у сировині. Дані таблиці 3 свідчать, що фосфатна сировина осадового типу містить більшу кількість природних радіонуклідів, ніж сировина, яка одержана з магматичних порід. Для фосфоритів більш помітний вміст і

неорганічних сполук таких елементів як Кадмій, Свинець, Арсен, які знаходяться у водорозчинній формі.

Ґрунтуючись на власних фізико-хімічних дослідженнях і токсиколого-гігієнічних та екологічних дослідженнях фосфатної сировини, були визначені вимоги щодо її безпечності для переробки і застосування в Україні. Уперше в нормативні вимоги до фосфатних концентратів введені обмеження за вмістом екологічно контрольованих елементів (кадмій, плюмбум, арсен) та за рівнем ефективної питомої активності природних радіонуклідів.

Аналіз існуючих виробництв мінеральних добрив показав, що заміна фосфатної сировини потребує додаткового вирішення технологічних завдань щодо зміни систем подачі сировини в технологічний процес через значне виділення пилу фосфориту під час транспортування; доопрацювання технологічного процесу виготовлення добрива в частині зміни таких параметрів як витратні норми сировини, теплотехнічний режим обладнання, рН розчинів і температура сушіння; коригування роботи систем управління технологічним процесом, що через нестабільну подачу реагентів знижує якісні показники готового добрива та збільшує кількість відходів. Новий вид сировини також потребує визначення додаткових обсягів викидів амоніаку та хлоридів у відхідних газах промислових підприємств, що потребують додаткової очистки як на окремих стадіях виробництва так і після сушильного обладнання.

Представлені методики експериментальних досліджень, методи аналізу, розроблені методики проведення кінетичних експериментів, досліджень процесу одержання гуматів та екологічно доцільних добрив.

У **третьому розділі** подані результати досліджень із визначення основних фізико-хімічних закономірностей та обґрунтування раціональних технологічних параметрів процесу одержання екологічно безпечного гранульованого амонізованого суперфосфату на основі фосфатної сировини Близького Сходу і Північної Африки.

Розрахунковим та аналітичним методами визначено мінеральний склад алжирського фосфориту. Установлено, що фосфатна складова представлена франколітом  $\text{Ca}_{10}[(\text{PO}_4)_{5,2} \cdot (\text{CO}_3)_{0,8} \cdot \text{F}_{0,8}] \cdot \text{F}(\text{OH})$ . Сполуки магнію розміщені повністю у складі доломіту, сполуки флуору, крім франколіту, існують у вигляді самостійної фази флуориту. Виявлено перебіг двох періодів розкладання алжирського фосфориту: перший – швидкий, рушійною силою є активна сульфатна кислота; другий – повільний, процес розкладання фосфатної сировини відбувається екстракційною фосфатною кислотою. Визначено, що залучення сполук  $\text{CaO}$ , у реакціях розкладання алжирського фосфориту сульфатною кислотою становить 90 – 95 %. Виявлено, що для розкладу фосфориту витрата сульфатної кислоти становить 760 – 810 кг у перерахунку на 100 %  $\text{H}_2\text{SO}_4$  на 1 т фосфориту. Встановлено, що у разі підвищення температури розкладу до 370 К витрати сульфатної кислоти зменшуються з 810 до 750 кг у перерахунку на 100 %  $\text{H}_2\text{SO}_4$  на 1 т алжирського фосфориту.

Екологічними обмеженнями пропонованої технології є необхідність підбору параметрів реалізації процесу, які б забезпечували максимальний ступінь

розкладання фосфоритів та мінімальний вихід забруднень (пари флуору, амоніаку) за умови досягнення нормованих технологічних показників отриманого добрива.

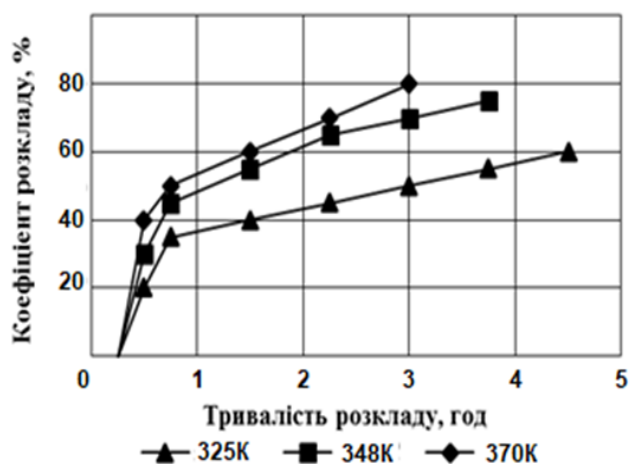


Рисунок 4 – Аналіз ресурсозбереження в технології амонізованого суперфосфату (залежність ступеня розкладання від тривалості реакцій та температури за умовної норми 810 кг 100 %  $H_2SO_4$ /т фосфориту)

Основні хімічні реакції процесу розкладання фосфатної сировини екзотермічні. Визначено теплові ефекти реакцій розкладання мінеральних компонентів алжирського фосфориту сульфатною кислотою. Для встановлення екологічно прийнятних параметрів розкладання алжирського фосфориту вперше розраховано сумарний тепловий ефект хімічних реакцій у процесі розкладання алжирського фосфориту, який підтвердив витрату сульфатної кислоти у межах 808,68 – 810 кг у перерахунку на 100 %  $H_2SO_4$  на 1 т фосфориту. Складено тепловий баланс процесу розкладання алжирського фосфориту з одержанням ортофосфорної кислоти, в результаті аналізу якого встановлено істотний вплив водного балансу процесу.

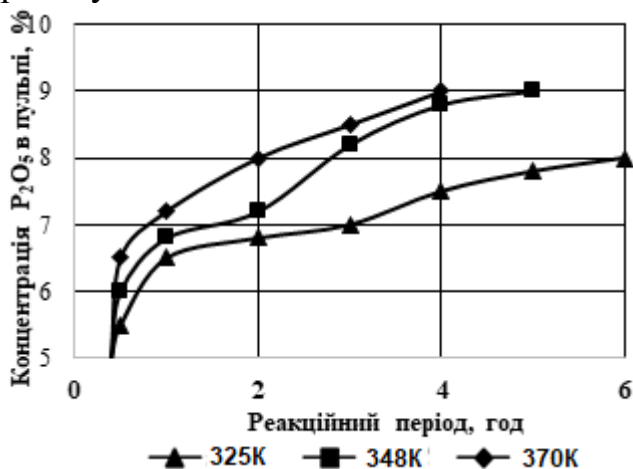


Рисунок 5 – Кінетика зміни концентрації  $P_2O_5$  у пульпі в режимі максимального ресурсозбереження

Результати досліджень процесу розкладання фосфориту за температури 325, 348 та 370 К подані на рисунку 4.

Дані, наведені на рисунку 4, свідчать, що максимальної повноти розкладання фосфориту (максимального ресурсозбереження) можна досягти за умови дотримання температурного інтервалу розкладання 348 - 370 К. Унаслідок входження флуору до складу слабозрочинних сполук і відсутності в рідкій фазі пульпи розкладання вільної сульфатної кислоти, виділення флуоровмісних сполук у газову фазу реактора розкладання низьке і не перевищує, згідно з лабораторними даними, 5 % від усієї маси флуору, що надходить із фосфоритом.

Кінетичними дослідженнями визначено, що прискоренню процесу сприяє не лише підвищення температури, а й інтенсифікація дифузійних процесів. На рисунку 5 показана зміна концентрації  $P_2O_5$  за перебігом повільної реакції залежно від реальної тривалості реакції і температури. Рисунок 5 свідчить, що для визначеного вище значення температурного інтервалу, що забезпечує максимальне ресурсозбереження 348 – 370 К, реальний час протікання реакції складає 4–5 годин. За допомогою диференціального рівняння Вант-Гоффа-Арреніуса -

розраховано константу швидкості реакції розкладання алжирського фосфориту сульфатною кислотою від температури. Аналітична форма залежності константи швидкості  $k$  від температури  $T$  має вигляд:

$$\ln k = C - (E/R)/T = 9,05 - (3605/T). \quad (1)$$

де  $T$  – абсолютна температура, К;  $R = 8,314$  універсальна газова постійна, Дж/(моль·К);  $E$  – енергія активації, постійна для даної реакції, Дж/моль;  $C$  – постійна інтегрування.

У **четвертому розділі** науково обґрунтовано і розроблено технології одержання екологічно безпечних NP- та NPK-добрив на основі ЕФК, виробленої з фосфоритів Північної Африки та Близького Сходу.

Екологічними обмеженнями до розробки технології є мінімізація забруднення довкілля за умови попередження забруднення атмосфери виділеним газоподібним флуором та  $\text{NH}_3$  в сушильних газах.

Уперше запропоновано, досліджено та впроваджено технологію одержання амофосу на основі алжирських фосфоритів. Виявлено, що одержання амофосу на основі ЕФК (26 %  $\text{P}_2\text{O}_5$ ) з алжирських фосфоритів супроводжується 15 %-ним витісненням перших іонів водню з ЕФК катіонами домішок зі складу вихідної фосфатної сировини. Як свідчать дані досліджень, в ЕФК з алжирського фосфориту переходить ряд домішок ( $\text{K}_2\text{O}$ ,  $\text{Na}_2\text{O}$ ,  $\text{MgO}$ ), що зв'язують перший іон ЕФК у комплекси виду  $\text{MeH}_2\text{PO}_4$ , де  $\text{Me}$  є сумою  $\text{K}$ ,  $\text{Na}$ ,  $\text{Mg}$  та інших активних катіонів. Встановлено, що від 10 % до 15 % перших іонів ЕФК, яку одержано з алжирських фосфоритів, замінено активними катіонами. Отже, в одержаній суміші солей вміст  $\text{N}$  менший. Тому для підвищення вмісту  $\text{N}$  в готовому продукті потрібно, щоб поряд із амоній дигідрофосфатом був присутній і амоній гідрофосфат. Обґрунтована необхідність у підвищених витратах (на 19,43 %)  $\text{H}_2\text{SO}_4$  в процесі перероблення алжирських фосфоритів (порівняно з апатитовим концентратом) на ЕФК – у дигідратному режимі. Доведено, що для одержання добрива, яке ідентичне за вмістом поживних елементів товарному амофосу (вміст  $\text{N}$  – 12 % та  $\text{P}_2\text{O}_5$  – 52 %),

амонізацію ЕФК необхідно проводити до значення  $\text{pH} = (4,55-4,65)$ . Молярне співвідношення  $\text{NH}_3:\text{H}_3\text{PO}_4$  становить (1,2–1,3) : 1. За допомогою діаграми розчинності проведено аналіз процесу нейтралізації амоніаком розбавленої ЕФК (рис. 6). У відповідності до практичних даних в процесі нейтралізації кислоти концентрацією не більше ніж 30 %  $\text{P}_2\text{O}_5$  до молярного співвідношення  $R = \text{NH}_3 : \text{H}_3\text{PO}_4$ , близького до 1, розвиваються температури 348 – 353 К.

Обґрунтовано граничну температуру висушування амонізованої пульпи (378 К), що пов'язано з підви-

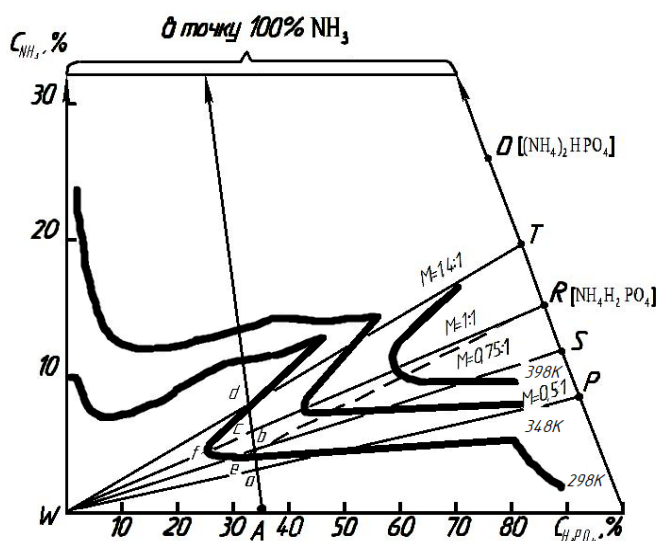


Рисунок 6 – Діаграма розчинності для розрахунку процесу нейтралізації ЕФК



щеною кількістю термонестабільного  $(\text{NH}_4)_2\text{HPO}_4$  у новоствореній амофосній пульпі. За результатами досліджень установлені особливості масштабу і закономірностей виділення флуору за запропонованим режимом одержання амофосу з алжирських фосфоритів. Зокрема, за відмінним від технології ЕФК на основі хібінських апатитових концентратів співвідношення  $\text{F} : \text{P}_2\text{O}_5$ , надходження  $\text{F}$ , надмірним вмістом  $\text{NH}_3$  в сушильних газах призвело до коригування роботи очисних систем.

Обґрунтовано і експериментально доведено, що одержання гармонізованого за складом  $\text{NPK}$ -добрива на основі ЕФК з алжирського фосфориту марки 14:14:14 пов'язано з проблемою досягнення необхідного вмісту азоту в готовому продукті тільки за рахунок підтримання підвищеного значення  $\text{pH}$  у процесі амонізації суміші, що містить ортофосфатну кислоту. Такі передумови обумовили необхідність введення підвищеної кількості сульфатної кислоти для забезпечення планованої концентрації азоту в добриві. Змішувались наважки ЕФК та сульфатної кислоти. Таким чином, реакційна суміш містила ЕФК, вільну сульфатну кислоту та сульфати катіонів домішок. Цю суміш нейтралізували амоніачною водою концентрацією 24,2 %  $\text{NH}_3$  до значення  $\text{pH} = 4,6$ . В одержаній  $\text{NP}$ -пульпі масове співвідношення  $\text{N}:\text{P}_2\text{O}_5$  складало 1:1.

За значення  $\text{pH}$  більше 5 у реакцію вступають водорозчинні сполуки катіонів домішок. Потім до продукту попередньої нейтралізації додавали  $\text{KCl}$  і завершили нейтралізацію суміші, доводячи  $\text{pH}$  пульпи до 7,65.

За результатами попередніх дослідів дійшли висновку, що для гарантованого одержання гармонійного за складом  $\text{NPK}$ -добрива необхідна більш глибока амонізація суміші кислот, а висушування  $\text{NPK}$ -пульпи доцільно проводити за більш низьких температур. Перший із перелічених заходів буде сприяти синтезу додаткової кількості  $(\text{NH}_4)_2\text{HPO}_4$ , а другий прийом загальмовує його терморозкладання на стадії висушування.

У подальших експериментах готували  $\text{NPK}$ -пульпу за методикою попереднього досліду, проте змінювали кількість амоніачної води, що вводилась у систему.

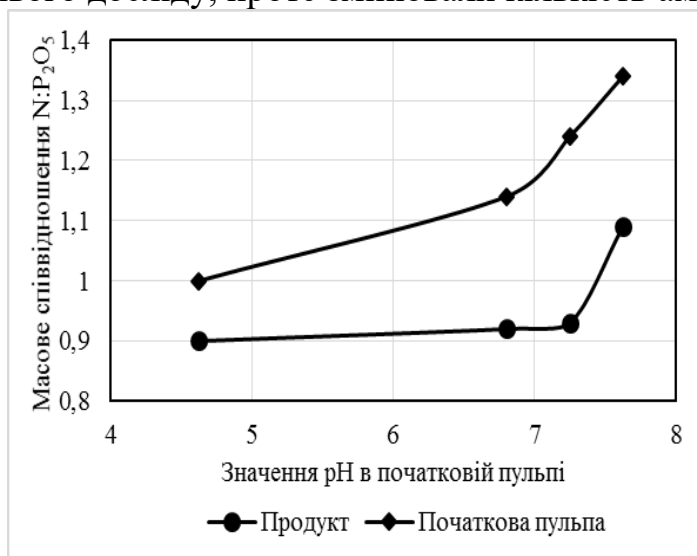


Рисунок 7 – Залежність співвідношення  $\text{N}:\text{P}_2\text{O}_5$  у кінцевому продукті від значення  $\text{pH}$  у початковій пульпі

Відповідно до цього збільшували значення  $\text{pH}$  у пульпі. Досліди (рис. 7) проведені в умовах отримання значення  $\text{pH}$  в пульпі 4,6; 6,8; 7,2; 7,65. Сушіння реалізували в умовах підтримання в сушильній шафі температури 378 К упродовж 25–28 год.

Висушені порошкоподібні продукти аналізували. На рисунку 7 показано, як впливає початкова величина  $\text{pH}$  приготованої  $\text{NPK}$ -пульпи на характеристики висушеного продукту, склад якого повинен відповідати гармонійному  $\text{NPK}$ -добриву. Втрати амоніаку в ре-

акційний простір в процесі сушіння становили майже 8 %. Для забезпечення екологічної безпеки процесу, для вловлювання амоніаку передбачена хемосорбційна система очищення сушильних газів. У лабораторних умовах за температури в сушильній шафі 378 К задане масове співвідношення у висушуваних продуктах  $N:P_2O_5 \approx 1:1$  було забезпечене лише за надлишку амоніаку в початковій пульпі збільшеному проти розрахункового на 25 – 30 %. Висушені порошкоподібні продукти аналізували.

Отже, проведеними дослідженнями встановлено технологічні основи одержання NPK-добрива марки 14:14:14 із фосфатів середземноморських родовищ, які забезпечують екологічну безпеку технології.

Розрахунковим і експериментальним методами доведена можливість одержання концентрованого складного добрива марки NPK=15:15:15 на основі алжирських фосфоритів шляхом використання як азотовмісної добавки також  $CO(NH_2)_2$  до фосфатів та сульфатів  $NH_4$  у технології концентрованих складних добрив. Найбільш істотною проблемою, пов'язаною із залученням сечовини у технологію NPK-добрив, є важкокерована ретроградація амідного азоту та небажана пластичність гомогенної суміші компонентів добрив за температур 363 - 413 К. За результатами теоретичних розрахунків втрат амідного азоту в процесі сушіння композицій добрив виявлено, що гарантованого вмісту азоту в кінцевому продукті можна досягти лише в процесі масового випуску добрива в промислових масштабах, коли коригування цього параметру пов'язується з конкретним проявом ретроградації в промислових апаратах конкретної конструкції.

У лабораторних умовах відтворена запропонована рецептура одержання NPK-добрива марки 15:15:15 із застосуванням сечовини як із сольових інгредієнтів, так і безпосередньо з сировинних компонентів. Екстраполяція технології NPK-добрива марки 15:15:15 на промислові апаратні можливості та умови показала, що сечовину необхідно вводити в сульфодіамофосну пульпу – продукт амонізації суміші фосфатної і сульфатної кислот. З метою визначення втрат амідного азоту готували сульфодіамофосну пульпу і вводили сечовину.

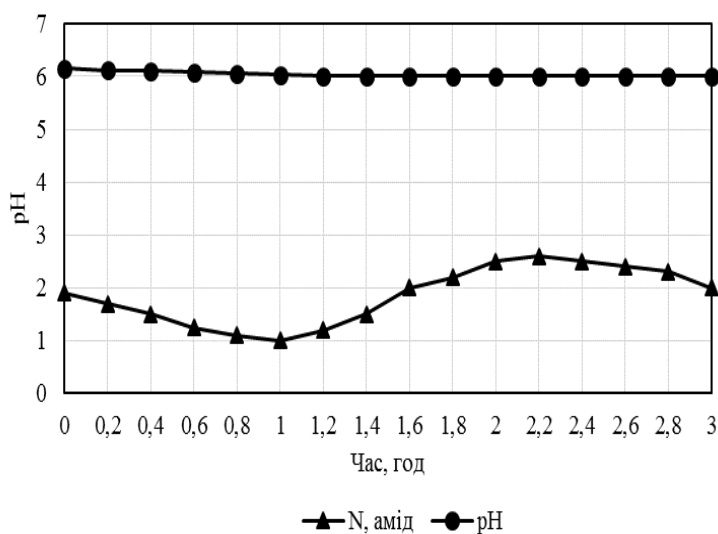
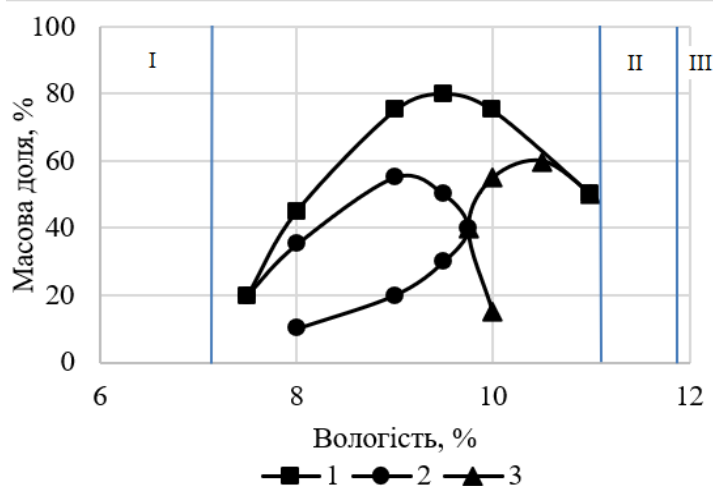


Рисунок 8 – Залежність зміни амідного азоту від часу висушування NP-пульпи

Одержану суміш підігрівали, підтримуючи температуру 353 К. Через 1, 2 і 3 години проби пульпи відбирали для аналізу. У пробах пульпи встановлювалися темпи зниження значення рН пульпи і зміни частки амідного азоту у складі загального азоту (рис. 8). Обґрунтоване оптимальне масове співвідношення у фосфатному комплексі початкової сульфодіамофосної пульпи становить  $N : P_2O_5 = 14,8 : 48$ . Припускаючи, що хлорид-іони можуть негативно впливати на стабільність сечовини, було пе-

ревірено поведінку сечовини в сульфодіамофосній пульпі, що містить КС1. У лабораторному експерименті у сульфодіамофосну пульпу перед введенням сечовини подавали наважку калій хлориду у встановленій за промисловими даними кількості.

У процесі упарювання рН дещо знизилося з 6,15 до 6,0 (за рахунок 10 %-ї втрати  $\text{NH}_3$  з діамонійфосфату), проте в концентраційному відношенні вміст загального азоту практично залишався в межах  $14,6 \pm 0,65$  %, причому якого-небудь помітного прояву гідролітичного розкладання сечовини не відзначено. Отже, в промисловому втіленні технології запас сечовини в системі повинен компенсувати його ретроградацію лише на стадії висушування. За результатами досліджень реко-



1 – цільова фракція 2–4 мм; 2 – фракція від 2 до 3 мм; 3 – фракція від 3 до 4 мм; I – зона нестабільної грануляції та саморуйнування гранул; II – зона формування макрогранул (> 6мм); III – зона повного порушення процесу грануляції

Рисунок 9 – Залежність масової частки товарної фракції гранул від вологості суміші

мендовано у пусковий період промислових випробувань технології NPK-доб-рива марки 15:15:15 на стадії приготування NP-пульпи, що збагачена сечовиною, вводити останню на 10-15 % більше кінцевої розрахункової потреби. Вироблені рекомендації щодо коригування теплотехнічного режиму, який потрібно підтримувати в апаратах БГС для одержання NPK-доб-рив. Експериментальні дослідження процесу грануляції (рис. 9) показують, що грануляцію методом окатування доцільно проводити за вологості суміші в межах 8–10 %. В отриманому зразку гранульованого NPK-доб-рива марки 15:15:15 із середньою вологістю 9,4 % масова частка гранул цільової фракції 2–4 мм становила 81%.

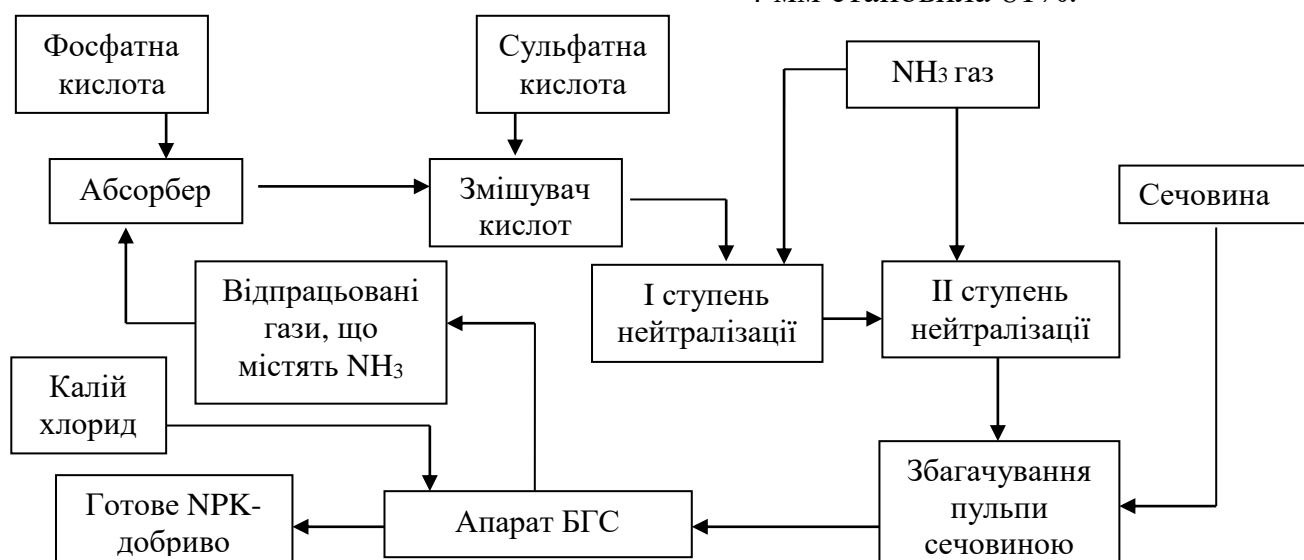


Рисунок 10 – Гнучка технологічна схема одержання складних мінеральних добрив

На основі проведених досліджень з одержання складних фосфоровмісних добрив на основі ЕФК, що вироблена з алжирських фосфоритів, розроблені принципи реконструкції технологічної схеми виробництва амофосу у напрямку створення гнучкої технологічної схеми складних NP та NPK-добрив (рис. 10) із можливістю регулювання співвідношення поживних речовин та забезпеченням екологічної безпеки реалізації технології.

Запропонована технологічна схема дозволяє організувати випуск широкої номенклатури складних NPK добрив шляхом коригування витратних норм сировини.

Розроблено теоретичні основи та технологічні закономірності реалізації принципово нової технології одержання баластних гумінових речовин із торфу (рис. 11).

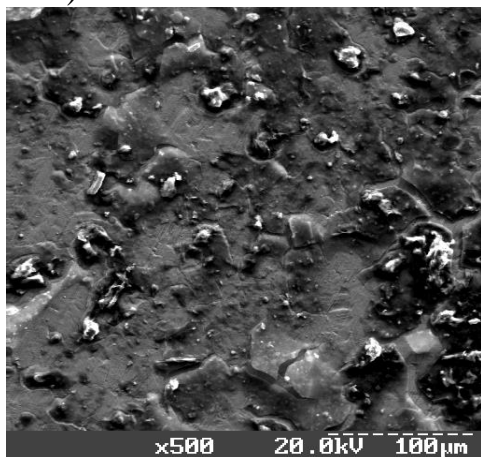


Рисунок 11 – Електронна фотографія гумату натрію ( $\times 500$ )

Визначено, що найбільш технологічною місцевою сировиною є низинний торф. За результатами досліджень технологічних параметрів одержання гумату натрію в механічному кавітаторі встановлено, що процес вилучення гуматів у рідку фазу завершується впродовж 300 с. рН розчину становить максимальну величину, яка дорівнює 12. Наведено засади технології виробництва баластних гумінових речовин із торфу в апараті інтенсивної дії, захищеної патентом України.

За результатами досліджень технологічних параметрів процесу одержання екологічно безпечного суперфосфату амонізованого із добавкою гумату натрію встановлено, що процеси грануляції та сушіння суперфосфату амонізованого відбуваються без зміни реології пульпи в процесі розпилювання одержаного продукту.

У **п'ятому розділі** розглянуто дослідження щодо створення ефективної екологобезпечної технології залучення до виробництва складних добрив українських зернистих фосфоритів із високим вмістом  $P_2O_5$  засв, вивчення основних технологічних параметрів агломерації фосфоритового борошна розчинами амоній сульфату з одержанням гранульованих добрив.

Екологічними обмеженнями є забезпечення необхідного ступеня очищення аспіраційного повітря, сушильних газів та мінімізація стоків у виробництві. Установлення мінімальних витрат енергії на реалізацію процесу на підставі ексергетичного аналізу.

Оскільки високий вміст  $P_2O_5$  засв у фосфоритному борошні дозволяє використовувати його як самостійне добриво, то виникає можливість одержання складних NP-добрив безкислотним способом - шляхом агломерації порошкоподібних матеріалів напівсухим способом із застосуванням пластифікатора на основі водного розчину амоній сульфату, характеристики якого: густина пульпи –  $1287 \text{ кг/м}^3$ ; масова частка N в пульпі – 12,1 %; масова частка  $(NH_4)_2SO_4 = 57,04 \%$ .

Дослідження технології одержання NP-добрива дозволили визначити, що оптимальним розміром частинок фосфоритового борошна для одержання гранул із максимальною статичною міцністю є полідисперсний склад борошна з частинками розмірами від 0 до 0,4 мм, який потребує меншої кількості пластифікатора.

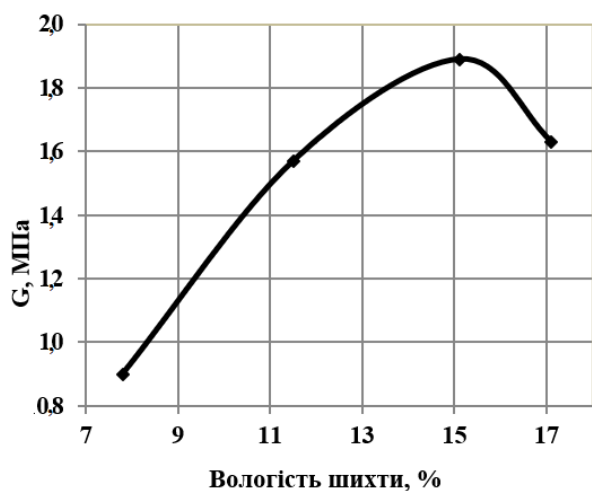


Рисунок 12 – Залежність міцності гранул фосфориту від вологості шихти

Визначення оптимальної для цього виду дисперсного складу фосфоритового борошна вологості показує (рис. 12), що ця залежність має екстремальний характер і для одержання гранул із міцністю більше ніж 1 МПа можна рекомендувати вологість, показники якої 11 – 13 %.

Іншим важливим показником гранульованого фосфоритового борошна є вихід товарної фракції під час агломерації пластифікатора. Проведені досліди за умовами попередніх значень вологості шихти показують, що вихід товарної фракції 1 – 4 мм має найбільше значення при вологості шихти 15 % (табл. 4).

Таблиця 4 – Вихід товарної фракції NP-добрива

Найменування показника	Номер досліджу						
	1	2	3	4	5	6	7
Вологість, %	8	10	11	11,5	14	15	17
Вихід товарної фракції 1 – 4 мм, %	50	57	61,5	66	68	71,5	63,5

У ході досліджень підтверджено, що в процесі грануляції методом агломерації відбуваються лише фізико-механічні процеси.

Відповідно до розроблених прийомів методу агломерації фосфоритового борошна напівсухим способом у тарілчастому грануляторі проведено опрацювання технології РК- та NPK-добрив. Дослідження одержання РК-добрива методом агломерації опрацьовувалось на зразках фосфоритового борошна з вмістом  $P_2O_5$  не менше ніж 20 % та калій хлориду із вмістом  $K_2O$  більше ніж 40 % та вмістом  $MgCl_2$  в перерахунку на  $MgO$  – 4,1 %. Як пластифікатор застосовували водний розчин калій хлориду в діапазоні від 20 до 25,5 %, що дозволило одержати добриво, як марки РК = 13:13 зі сталими характеристиками, так і ряд оригінальних рецептур, як-от РК = 14:11, 15:9, 16:7 та 17:5.

Відпрацювання технології напівсухого способу агломерації дозволило розробити технологію одержання NPK-добрив. У процесі одержання NPK-добрива марки 11:15:11 на основі фосфат-глауконітового борошна Ново-Амвросіївського родовища як азотовмісну сировину застосовували сечовину, а як калійну складову – калій хлорид. У шихту вводили пластифікатор у вигляді 60 % розчину сечовини, що дозволило одержати гранульований продукт зі статичною міцністю 1 МПа. Отже,

проведені дослідження підтвердили можливість виробництва не лише добрива марки 11:15:11, а й цілого класу складних добрив на основі фосфоритового борошна з умістом  $P_2O_5$  засв більше 80 %. Розроблена технологія напівсухого способу агломерації дозволила опрацювати також такі марки NPK-добрив як 19:19:19, 16:16:16, 20:10:0 на основі порошкоподібних сечовини, амофосу, калій хлориду та фосфоритового борошна.

Математична обробка експериментальних досліджень щодо визначення вологості суміші порошків ( $W$ ) в залежності від вмісту азоту в розчині пластифікатору ( $a$ ) та суми компонентів  $P_2O_5$  і  $K_2O$  ( $b$ ) в порошку показала, що ця залежність описується рівнянням регресії першого порядку, яка представлена на рисунку 13.

$$W = 11,648 - 0,3709 \cdot a + 0,0635 \cdot b. \quad (2)$$

Коефіцієнт детермінації рівняння (2) складає  $R^2 = 0,9743$ .

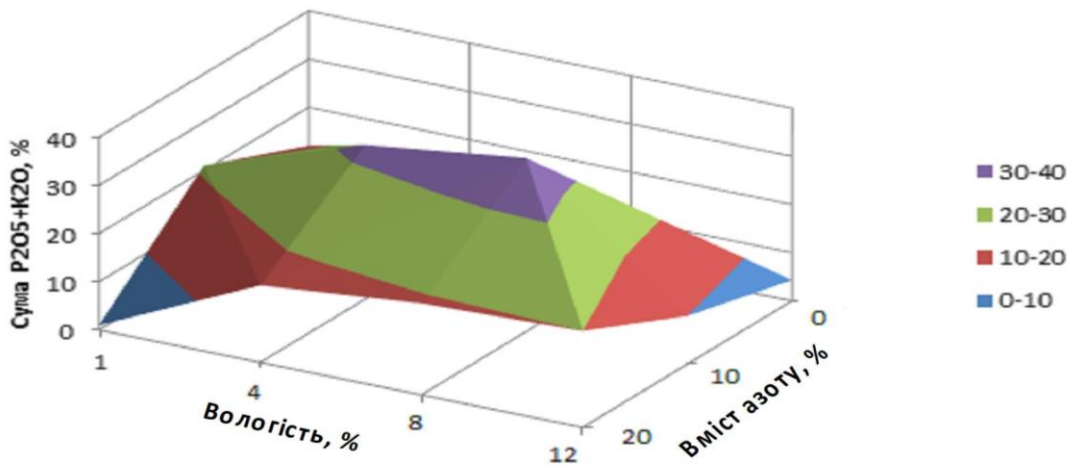


Рисунок 13 – Залежність вологості суміші добрив від вмісту азоту в рідкій фазі і суми фосфору і калію в твердій фазі

Для об'єктивного оцінювання якості використаної теплової енергії технічною системою у виробництві амонізованого суперфосфату було складено ексергетичний баланс виробництва і оцінено ефективність кожної стадії. Складові ексергетичного балансу (величини ексергії та ексергетичного ККД) визначали згідно з методикою: 1) на першому етапі позначали основні матеріальні потоки з визначенням температур усередині технологічних апаратів та зовні; 2) ексергію основних потоків визначали виходячи з їх агрегатного стану:

- якщо потік – рідина або у твердому стані:

$$E_{\text{нульн}} = m \cdot c \cdot \left[ (T - T_0) - T_0 \ln \frac{T}{T_0} \right], \quad (3)$$

де  $m$  – кількість компонента (поток), кг;  $c$  – питома теплоємність компонента, Дж/(кг·К);  $T$  – температура компонента на вході в апарат, К;  $T_0$  – температура довкілля (температура всередині апарата), К;

- якщо потік – пара або газ:

$$E = m \cdot e, \quad (4)$$

де  $m$  – кількість компонента (потіку), кг;  $e$  – його питома ексергія, Дж/кг.

Ексергетичний ККД ( $\eta_e$ ) дорівнює:

$$\eta_e = \frac{E_{\text{вит}}}{E_{\text{надх}}} = \frac{E_{\text{надх}} - E_{\text{втр}}}{E_{\text{надх}}}, \quad (5)$$

де  $E_{\text{надх}}$  – надходження ексергії з технологічними потоками в апарат, Дж;  $E_{\text{вит}}$  – витрата ексергії з технологічними потоками з апарата, Дж;  $E_{\text{втр}}$  – втрати ексергії, Дж.

Ексергетичний ККД ( $\eta_e$ ) більш точно, порівняно з тепловим ККД, визначає ексергетичну цінність як вихідних сировинних потоків, так і продукційних.

Ексергетичну діаграму всіх вхідних і вихідних потоків речовин наведено на рисунку 14.

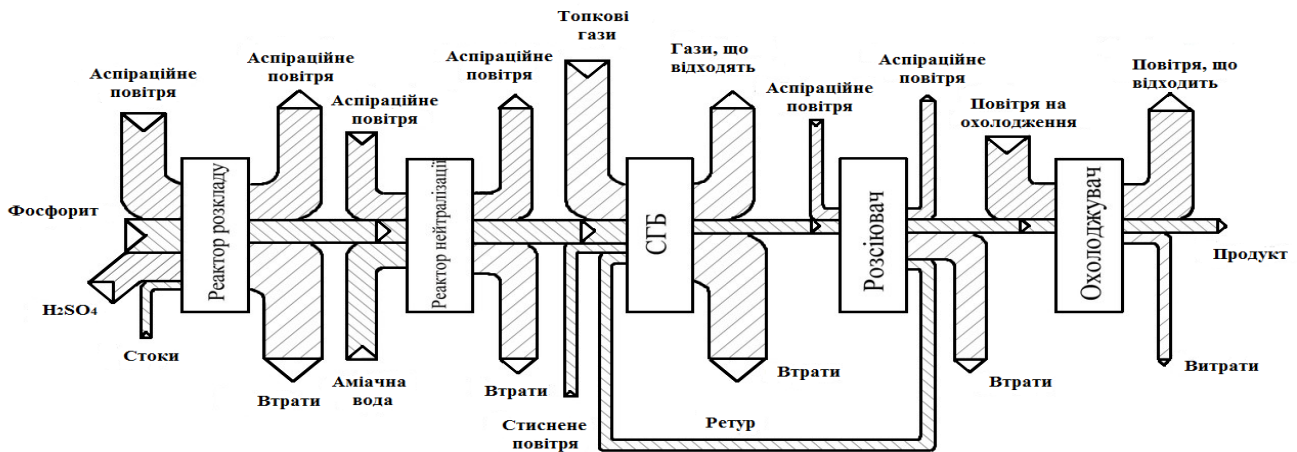


Рисунок 14 – Діаграми потоків ексергії виробництва амонізованого суперфосфату

З точки зору ексергетичного аналізу найнеефективнішою стадією є процес охолодження гранульованого продукту: найбільші ексергетичні втрати (до 77 % від загального надходження) і найменший ексергетичний ККД = 23 %.

За результатами розрахунків визначені та обґрунтовані технологічні особливості введення добавки гумату натрію в реактор нейтралізації.

Уперше проведено ексергетичний аналіз виробництва фосфорно-калійного добрива марки РК-13:13, яке одержують напівсухим методом агломерації – фосфоритне борошно гранулюється за допомогою пластифікатора на основі сполук калію за вологості шихти не більше ніж 12 % (рис. 15). На стадії сушіння гранул центральним апаратом є барабанна сушарка, яка має низьку енергоефективність, що дорівнює 0,02 – 0,03 кг/кДж. Аналіз ексергетичних втрат на стадії сушіння засвідчив, що значне зниження температури сушильного агента від 823 до 363 К обумовлює практичну відсутність втрат (усього 0,2 %) від недосконалості теплообміну за кінцевої різниці температур.

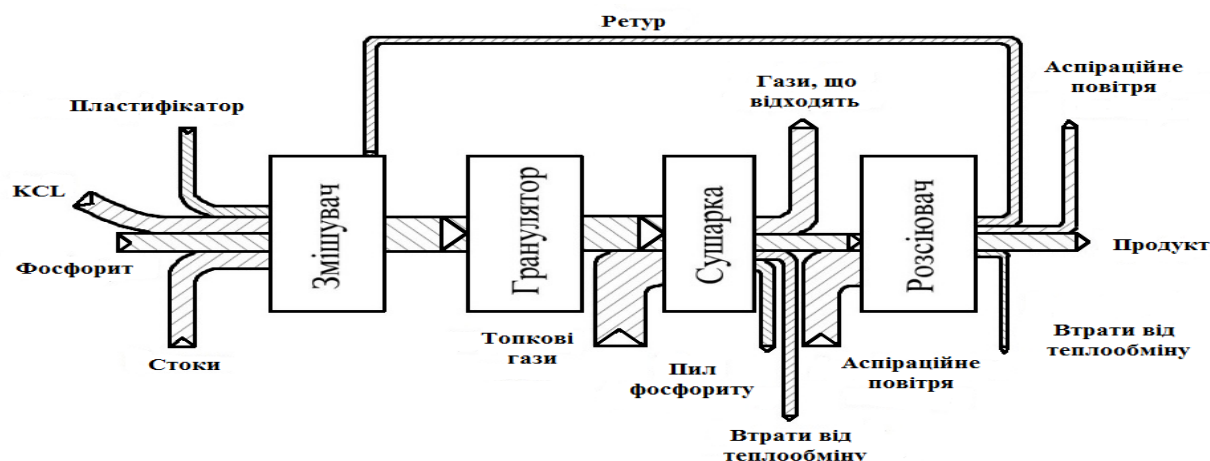


Рисунок 15 – Діаграма потоків ексергії виробництва фосфорно-калійних добрив

Отже ексергетичний аналіз барабанної сушарки показує, що вона є найбільш енергоємною ланкою в технологічному процесі, але досить ефективним апаратом, оскільки ексергетичні втрати незначні (всього 15 % від загального надходження), а ексергетичний ККД досягає досить високого значення – 85 %. Оскільки РК-добриво за своєю поживною цінністю ідентичне амонізованому суперфосфату, то у таблиці 5 наведено сумарні ексергетичні втрати на основні технологічні стадії виробництва РК-добрива й амонізованого суперфосфату.

Таблиця 5 – Ексергетичні втрати виробництв фосфорно-калійного добрива та амонізованого суперфосфату

Технологічні стадії	Ексергетичні втрати, кДж/т	
	амонізований суперфосфат	фосфорно-калійне добриво
1. Перероблення сировини	31532	0
2. Гранулювання і сушка	212636	68874
3. Розсіювання гранул	2963	7290
4. Охолодження товарної фракції	7997	-
Всього на виробництво	255128	76164

Порівняння енергетичних втрат за основними технологічними стадіями показує, що загальні ексергетичні втрати, а відповідно, й енергетичні витрати у виробництві фосфорно-калійних добрив напівсухим способом на 70 % менші від аналогічних витрат у виробництві амонізованого суперфосфату і на  $2,85 \cdot 10^3 \text{ м}^3$  зменшуються викиди парникового газу у перерахунку на 1 тону добрива, що виробляється, що свідчить про енергозберігаючу особливість запропонованої технології та істотне зниження теплового забруднення довкілля.

У шостому розділі розглянуті комплексні агрохімічні й екологічні дослідження фосфоровмісних добрив, виготовлених із закордонної та вітчизняної сировини, порівняно з традиційними туками з визначенням їх впливу на агроекологічні показники родючості ґрунту, якість сільськогосподарської продукції та вмісту важких металів в ґрунтах і рослинницькій продукції. Проведені агроекологічні дослідження розроблених марок фосфоровмісних добрив засвідчили, що їх застосування підвищує врожайність сільськогосподарських культур на 30 –



65 % залежно від марки та свідчить, що при внесенні агрохімічно обґрунтованих норм добрив уміст важких металів у ґрунті не виходить за межі їх фонової концентрації.

Більша добавка характерна для добрив із додаванням гумату натрію. ОМД підвищують продуктивність рослин в 1,1–1,8 рази.

У дослідженнях з озимою пшеницею та озимим житом встановлено, що позитивна дія «Агрофоски» марки РК – 14:4 виявилась у збільшенні кущистості, довжини колосу та маси зернин. Якість врожаю зерна озимих культур під дією «Агрофоски» значно підвищувалась, особливо у разі внесення її в запас. Виконані дослідження свідчать про досить високу біологічну та економічну ефективність нового виду добрив – вони перебувають практично на рівні суперфосфату. Проведені польові агроекологічні дослідження добрива з додаванням гумату натрію («Амофос» із вмістом: N – 10,9 %;  $P_2O_5$ <sub>заг</sub> – 49,3 %;  $P_2O_5$ <sub>засв</sub> – 49,3 %;  $P_2O_5$ <sub>в.р.</sub> – 45,4 %;  $H_2O$  – 0,3 %; рН 10 % суспензії – 4,45; Cd – 22,7 мг/кг; Pb – 33 мг/кг; As – 2,5 мг/кг, гумат – 1,2 %) та «Гуміагрофоска» (NPK-добриво марки 1:18:6 із вмістом:  $P_2O_5$ <sub>заг</sub> – 17,7 %;  $P_2O_5$ <sub>засв</sub> – 15,2 %;  $N_{амон}$  – 0,76 %;  $K_2O$ <sub>заг</sub> – 4,7 %;  $H_2O$  – 1,04 %; гумат – 2 %), показали (рис. 16) стабільне та максимальне збільшення врожаю зеленої ма-

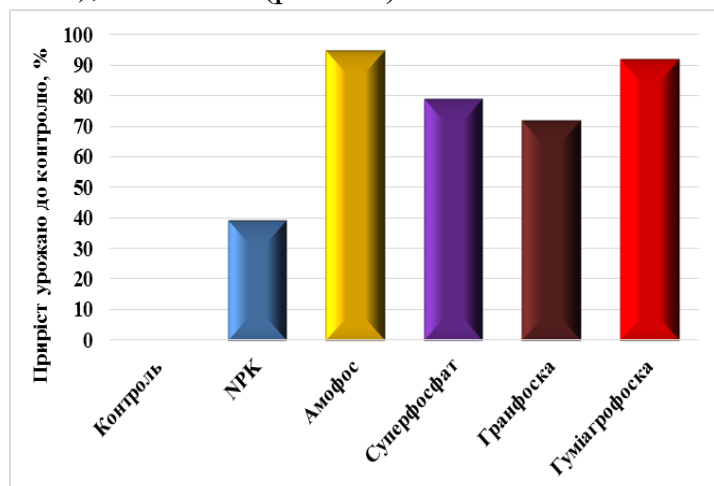


Рисунок 16 – Вплив фосфоровмісних добрив на урожай зеленої маси кукурудзи

си кукурудзи. Результати польового сезону також підтверджують позитивний вплив добрив із добавками гуматів натрію на підвищення вмісту гумусу та поживний режим ґрунтів.

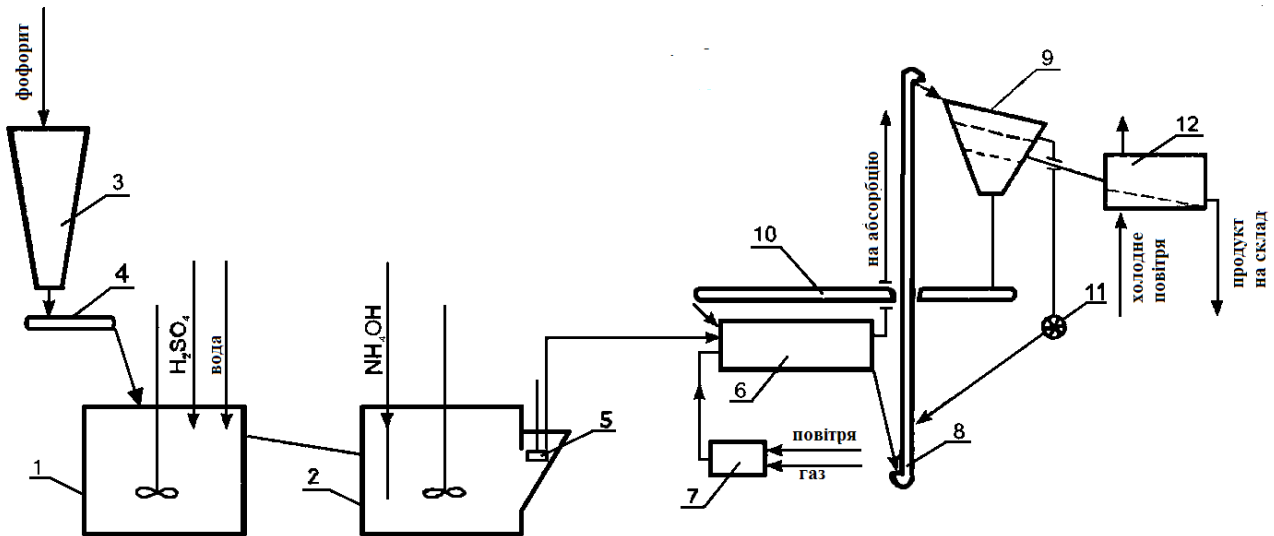
Проведені розрахунки визначення біоенергетичної ефективності екологічно безпечних добрив у сільському господарстві показали, що технологія ОМД на основі українських фосфоритів та гумату натрію дає можливість більше, ніж удвічі, знизити кількість мінераль-

них добрив для вирощування такої самої кількості врожаю. Це дозволяє розглядати запропоноване технічне рішення з виробництва та застосування ОМД на основі фосфоритів українських родовищ та гумату натрію як ресурсоенергозберережну технологію вирощування сільськогосподарських культур.

Проведені розрахунки економічного ефекту впровадження технології виробництва складних добрив із добавками гумату натрію на прикладах виробництва амофосу і NPK-добрив марки 15:15:15 з добавками гумату натрію доводять, що за обсягом виробництва добрив 100 тис т за 1 рік очікуваний додатковий річний дохід ( $D_{дод}$ ) та очікуваний додатковий річний прибуток становлять у виробництві амофосу 2,7 млн грн та 1,9 млн грн відповідно, а у виробництві NPK-добрив марки 15:15:15 – 2,0 млн грн та 1,3 млн грн.

У сьомому розділі наведено результати промислових випробувань розроблених екологічно безпечних технологій перероблення закордонних фосфоритів на амонізований суперфосфат та складні мінеральні добрива. Дослідно-

промислові випробування технології виробництва амонізованого суперфосфату проведені у суперфосфатному цеху ПАТ «Сумихімпром». Амонізований суперфосфат одержували поточним способом двома стадіями: утворенням пульпи необхідного складу; гранулюванням, сушінням пульпи і класифікацією гранульованого суперфосфату (рис. 17).



1 – I реактор (Е 204/а); 2 – II реактор (Е 204/б); 3 – бункер фосфориту;  
4 – дозатор фосфориту; 5 – насос подання пульпи на гранулювання; 6 – апарат гранулювання та сушіння БГС; 7 – теплогенератор; 8 – елеватор; 9 – грохот;  
10 – конвеєр; 11 – дробарка; 12 – холодильник

Рисунок 17 – Принципова схема виробництва амонізованого суперфосфату

У ході випробувань було визначено, що нормалізацію умов грануляції було досягнуто лише за подачі 910 кг у перерахунку на 100 %  $H_2SO_4$  на 1 т фосфориту, і саме ця норма забезпечує отримання готового продукту з нормативним значенням  $P_2O_5$  засв не менше ніж 16 %, та що зазначена норма сульфатної кислоти дозволяє одержувати продукт незалежно від значення  $P_2O_5$  засв у фосфориті. В той же час, як показано на рисунку 18, за збільшенням витрати сульфатної кислоти монотонно знижується вміст  $P_2O_5$  заг, хоча і зростає вміст  $P_2O_5$  в.р.

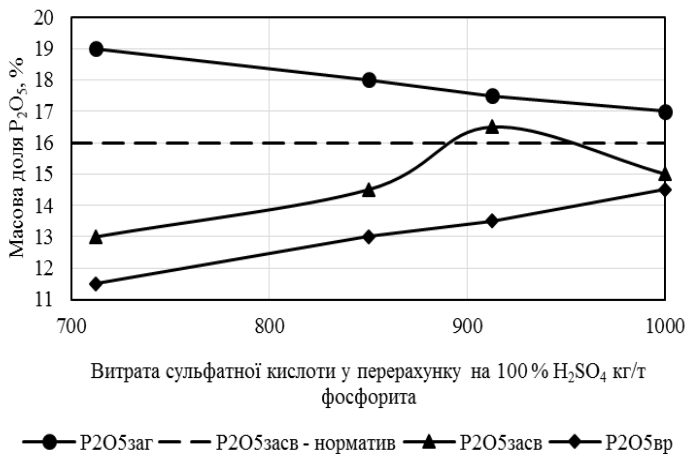
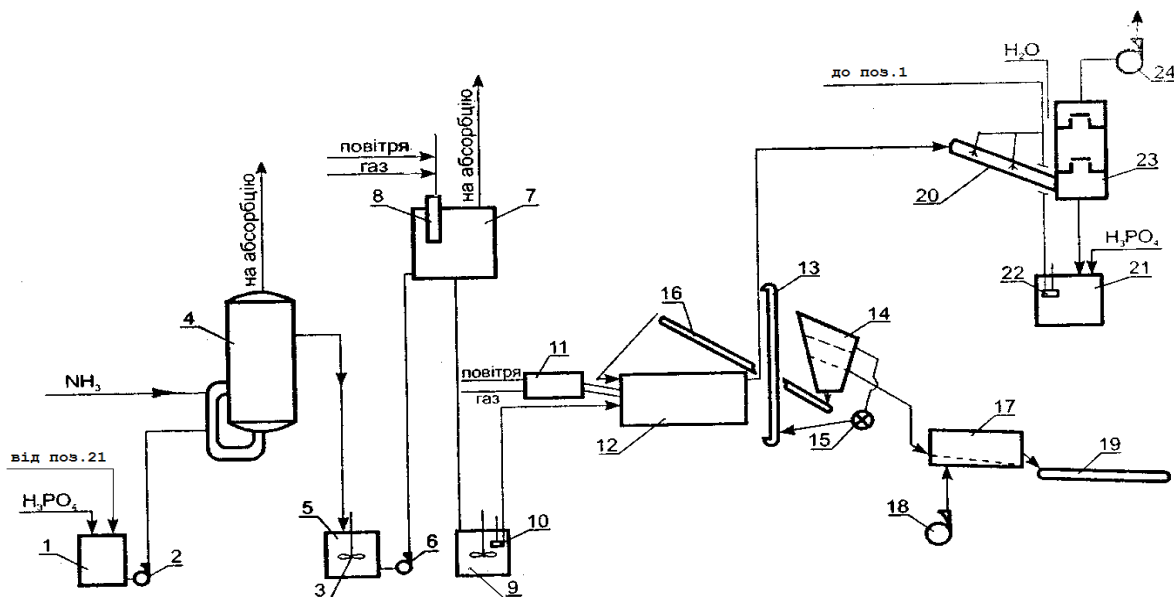


Рисунок 18 – Масова частка  $P_2O_5$  заг,  $P_2O_5$  засв,  $P_2O_5$  в.р. у готовому продукті

На описаному обладнанні науково обґрунтована та експериментально підтверджена можливість прямого синтезу складного NPK добрива марки 6:11:11 без застосування фосфатної кислоти. Напрацьовано дослідно-промислову партію продукту у кількості 1300 т. На технологію одержання складного NPK-добрива марки 6:11:11 отримано деклараційний патент України № 51 441 А. У промислових умовах на устаткуванні цеху амонізованого

суперфосфату ПАТ «Сумихімпром» реалізована екологічно безпечна технологія гумосуперфосфату. Одержано 90 т кондиційного продукту такої якості:  $P_2O_5$  заг – 20,31 %,  $P_2O_5$  засв – 19,99 %,  $P_2O_5$  в.р. – 16,66 %,  $P_2O_5$  вільн – 1,67 %,  $N_{амон}$  – 3,55 %,  $H_2O_{заг}$  – 2,80 %, гумати – 0,83 %. Статична міцність – 4,38 МПа. На технологію одержання гумосуперфосфату отримано патент на корисну модель № 57307.

На обладнанні цеху амофосу ПАТ «Сумихімпром» у промислових умовах опрацьована технологія одержання складних NPK-добрив марки 14:14:14 та 15:15:15 із застосуванням як азотовмісної складової сечовини, що дозволило виробити близько 1100 т NPK-добрива марки 14:14:14 та 1 000 т марки 15:15:15. Принципова схема виробництва складних добрив представлена на рис. 19.



1, 5, 9, 21 – бак; 2, 6, 10, 22 – насос; 3 – мішалка; 4 – швидкісний амонізатор-випаровувач; 7 – випарний апарат; 8 – занурений пальник; 11 – піч; 12 – БГС; 13 – елеватор; 14 – грохот; 15 – дробарка; 16 – скребковий конвеєр; 17 – холодильник; 18, 24 – вентилятор; 19 – конвеєр; 20 – газохід; 23 – абсорбер

Рисунок 19 – Принципова схема виробництва складних добрив

Продукт за своїми характеристиками задовольняв вимоги ТУ У6-05766356.038-99 «Добриво складне мінеральне «СУПЕРАГРО». На технологію одержання складного NPK-добрива марки 15:15:15 отримано патент України № 62255 А. За ліцензійним договором технологія передана для впровадження на ПАТ «Сумихімпром». Економічний ефект від впровадження технології за винаходом становить 43,74 млн грн.

У промислових масштабах на обладнанні цеху простого суперфосфату ПАТ «Сумихімпром» впроваджена безкислотна технологія гранульованого азотно-фосфорного добрива марки NP – 2:16 на основі фосфоритної муки та амоній сульфату. У ході дослідно-промислових випробувань отримано 180 т гранульованого продукту, який за своїми характеристиками задовольняв вимоги ТУ У6-14005076.041-2000 «Гранфос» марки СА, перший сорт. На технологію одержання складного NP-добрива марки 2:16 отримано деклараційний патент

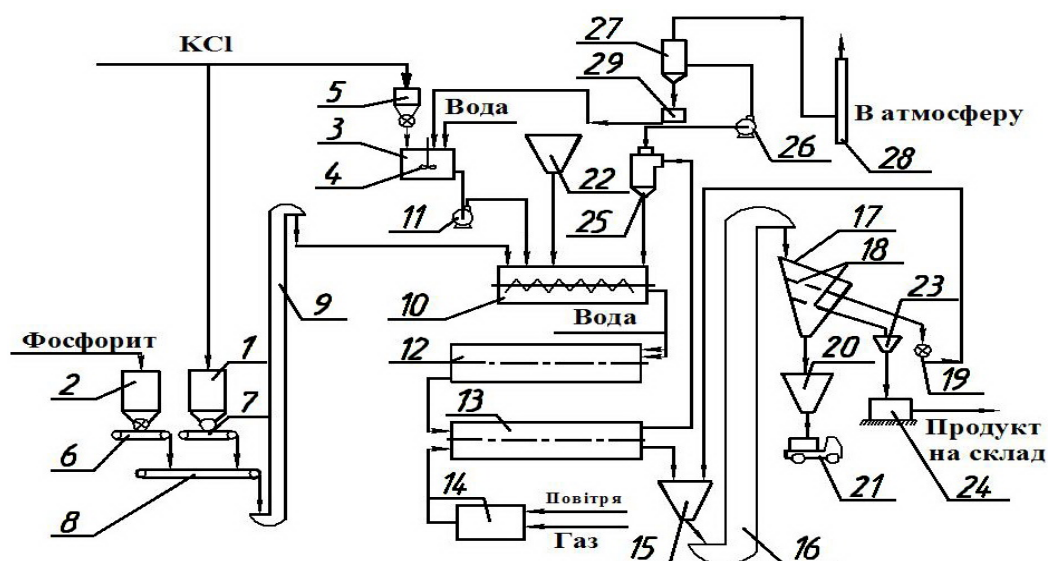
України № 48573 А. За ліцензійним договором технологія передана для впровадження на ПАТ «Сумихімпром».

Визначення сумарного впливу виробництва екологічно безпечних добрив оцінювалося санітарною лабораторією підприємства через результати вимірювань викидів амоніаку в чотирьох точках на межі санітарної зони підприємства порівняно з ГДК ( $\text{NH}_3 - 0,2 \text{ мг/м}^3$ ) в атмосферному повітрі населених місць (максимально разова доза) відповідно до ДСП-201-97 (табл. 6).

Таблиця 6 – Результати вимірювань забруднювальних речовин в атмосферному повітрі на межі санітарно-захисної зони підприємства

Найменування контрольної точки	Масова концентрація амоніаку, $\text{мг/м}^3$ (середні дані), за роками		
	2007	2010	2015
Північний схід	0,034	0,03	0,034
Схід	0,033	0,025	0,04
Південний захід	0,031	0,027	0,032
Північний захід	0,037	0,027	0,021

У промислових умовах ТОВ «Завод мінеральних добрив «Базис» упроваджена безкислотна технологія гранульованого РК-добрива напівсухим способом марки РК – 17 :6 (рис. 20).



1 – бункер калію хлористого; 2 – бункер фосфориту; 3 – бак для приготування пластифікатора; 4 – мішалка; 5 – тензобункер; 6 – дозатор фосфориту; 7 – дозатор калій хлориду; 8 – закритий стрічковий конвеєр; 9 – норія; 10 – змішувач; 11 – насос; 12 – барабанний гранулятор; 13 – сушильний барабан; 14 – теплогенератор; 15 – бункер; 16 – норія; 17 - вібраційний класифікатор; 18 – сита; 19 – валкова дробарка; 20 – накопичувальний бункер; 21 – навантажувач; 22 – бункер ретурну; 23 – бункер готової продукції; 24 – установка фасування готової продукції; 25 – циклон; 26 – димосос; 27 – скруббер; 28 – вихлопна труба; 29 – бак

Рисунок 20 – Принципова схема виробництва фосфорно-калійного добрива марки РК напівсухим способом

Технологія на основі фосфоритної муки і калій хлориду реалізується за типовою ретурною схемою шляхом послідовних операцій дозування компонентів, їх змішування з додаванням пластифікатору, грануляції і сушки продукту. Обмежувальними вимогами до калій хлориду була необхідність додаткового помелу у барабанному млині, щоб частки КСl проходили не тільки через комірки 0,4 мм, але й до 75 % проходили через комірки 0,18 мм.

Попередня оцінка пилогазових викидів показала, що в апараті «мокрого» пиловловлювання маса вловленого пилу складала  $\approx 54 \text{ мг/дм}^3$ , а винос води у вигляді пари зафіксований на рівні  $(13 - 15) \text{ дм}^3 / \text{год}$ .

Продукт за своїми показниками відповідав вимогам ТУ У 24.1-14005076-073:2007 «Мука фосфоритная калийно-магниевая гранулированная»

У цілому, за результатами дослідно-промислових випробувань розроблених і впроваджених технологій екологічно безпечних NPK-, NP-, та PK-добрив, зокрема нових ОМД із домішкою гуматів, можна зробити висновок щодо повного підтвердження виявлених лабораторно-експериментальними дослідженнями фізико-хімічних закономірностей взаємодій вихідних компонентів і сполук в умовах великомасштабних технологічних процесів.

У відповідності до положень розробленої стратегії зі створення нових екологічно безпечних технологій фосфоровмісних добрив на етапах їх виробництва і застосування розрахований еколого-енерго-економічний ефект з визначенням коефіцієнтів екологічності. Переваги запропонованої технології у розрізі екологічної безпеки полягають у таких аспектах: 1) зменшенні кількості твердих відходів і пилогазових викидів та скороченні енерговитрат на 1 тонну продукції; 2) підвищенні у два рази коефіцієнту біоенергетичної ефективності розроблених добрив при застосуванні їх у сільському господарстві; 3) зниженні більш ніж у два рази коефіцієнту екологонебезпечного навантаження мінеральних добрив на земельні угіддя, що забезпечує раціональне використання природних ресурсів, та дотримання форматів запобігання шкідливому впливу на довкілля та здоров'я людини.

## ВИСНОВКИ

Для мінімізації екологічної небезпеки від забруднення довкілля токсичними елементами фосфатної сировини на підставі розвитку науково-теоретичних основ раціонального застосування фосфоритів вітчизняного і закордонного походження, визначення рівня їх безпечності, умов перероблення і створення екологічно безпечних технологій їх виробництва та застосування у дисертації розроблено і обґрунтовано наукові положення, висновки і рекомендації, сукупність яких становлять нові науково обґрунтовані результати в галузі екологічної безпеки.

1. Проведено комплексні системні еколого-токсикологічні і технологічні дослідження складу та властивостей вітчизняної і закордонної фосфатної сировини та фізико-хімічних методів її перероблення для одержання фосфатної кислоти та на її основі складних фосфоровмісних добрив. За результатами досліджень зразків фосфоритів країн Близького Сходу та Північної Африки визначені критичні показники екологічної безпечності фосфоритів на території України, якими є вміст у

фосфоритах кадмію, плюмбуму, арсену та ефективна питома активність природних радіонуклідів: – кадмію – не більше 30 мг/кг, плюмбуму – 25 мг/кг, арсену – 14 мг/кг та ефективної питомої активності природних радіонуклідів – не більше ніж 1850 Бк/кг.

2. Визначені основні фізико-хімічні закономірності та особливості перебігу процесу розкладання алжирського фосфориту сульфатною кислотою за умови дотримання екологічної безпеки виробництва амонізованого суперфосфату з одержанням гранульованого продукту. Доведено, що вміст у фосфориті сполук лужних металів забезпечує зв'язування сполук флуору у вигляді погано розчинних калій гексафлуоросилікату ( $K_2SiF_6$ ) і натрій гексафлуоросилікату ( $Na_2SiF_6$ ), що забезпечує виділення у газову фазу реактора розкладання лише 5 % від усієї маси флуору, що надходить із фосфоритом. Аналіз ресурсозбереження в технології амонізованого суперфосфату засвідчив, що при підвищенні температури розкладання до 370 К витрати сульфатної кислоти зменшуються з 810 до 750 кг у перерахунку 100 %  $H_2SO_4$  на 1 т алжирського фосфориту, що забезпечує екологічні умови зменшує екологічне навантаження на довкілля під час виробництва добрива.

3. За результатами комплексних експериментальних досліджень доведена можливість заміни екстракційної фосфатної кислоти, одержаної з апатитового концентрату, на екстракційну кислоту із закордонних фосфоритів, що не потребує корінних змін технології екологічно безпечних складних добрив та забезпечує екологічну безпеку виробництва. Доведено, що для одержання амофосу із вмістом N – 12 % і  $P_2O_5$  – 52 % амонізацію фосфатної кислоти необхідно проводити до значення рН = (4,55 – 4,65) із молярним співвідношенням  $NH_3 : H_3PO_4 = (1,2 - 1,3) : 1$ , а граничну температуру сушіння амонізованої пульпи підтримувати не вище ніж 378 К, що зменшить розклад термонестабільного  $(NH_4)_2HPO_4$  та кількість амоніаку, що надходить до системи абсорбції. Визначено, що отримання урівноваженого NPK-добрива марки 14:14:14 можливе на основі амонійно-фосфатного комплексу, близького до складу амоній гідроортофосфату  $(NH_4)_2HPO_4$ , із веденням підвищеної кількості сульфатної кислоти у вигляді сульфатного аніона і за рахунок підтримання підвищеного значення рН в процесі амонізації суміші, що дозволяє зменшити витрати амоніаку для забезпечення планованої концентрації азоту і знизити викиди цього газу під час сушіння грануляту. Доведена можливість використання  $CO(NH_2)_2$  в якості добавки до фосфатів і сульфатів  $NH_4$  у технології концентрованих складних добрив марки 15:15:15 на основі перероблення сульфодіамофосної пульпи. Дослідженнями визначено, що ретроградація амідного азоту в сульфодіамофосній пульпі й аналогічній пульпі з вмістом до 2 %  $K_2O$ , незначна і проявляє себе в основному на стадії сушіння, де зафіксовані втрати сечовини не більше ніж 10 %. Розроблена екологічно безпечна гнучка технологічна схема одержання складних NPK-добрив.

Розроблено безкислотний метод одержання нових видів екологічно доцільних добрив на основі фосфоритового борошна з високим умістом  $P_2O_5$  засв, які виробляють напівсухим способом - агломерацією фосфоритового борошна пластифікатором.

4. З метою підвищення поживної цінності та екологічної безпеки ОМД проведено комплексний аналіз вихідної сировини для одержання гуматів лужних

металів та розроблено технологічні закономірності реалізації принципово нової технології одержання баластних гумінових речовин із торфу в апараті інтенсивної дії, захищеної патентом України.

5. Для підвищення екологічної безпеки й енергозбереження шляхом зменшення теплового забруднення довкілля вперше виконано порівняльний ексергетичний аналіз виробництв амонізованого суперфосфату і РК-добрив безкислотним методом та оцінено ефективність стадій їх виробництва. Порівнянням енергетичних витрат виробництв амонізованого суперфосфату потоковим методом та РК-добрив безкислотним методом обґрунтована енергоощадна технологія і показано, що під час виробництва РК-добрив на основі низькоякісної фосфатної сировини вітчизняних родовищ енергетичні витрати зменшуються на 70 % порівняно з виробництвом амонізованого суперфосфату і на  $2,85 \cdot 10^3$  м<sup>3</sup> зменшуються викиди парникового газу в перерахунку на 1 тону добрива, що виробляється.

6. Ґрунтуючись на результатах лабораторних досліджень, виконано комплекс науково-дослідних, проектно-конструкторських і впроваджувальних робіт у промислових масштабах на виробництвах ПАТ «Суміхімпром» із реалізації технології одержання екологічно безпечних амонізованого суперфосфату двох марок, NPK-добрива марки 6:11:11 та гумосуперфосфату при забезпеченні викидів амоніаку після системи абсорбції нижче ніж ГДВ і на межі санітарної зони нижче ніж ГДК для населених місць. На обладнанні цеху проведено впроваджувальні роботи щодо створення гнучкої технологічної схеми складних екологічно безпечних добрив: амофосу і складних NPK-добрив марок 14:14:14 і 15:15:15. Фактичний економічний ефект від упровадження технології одержання складного NPK-добрива «Суперагро», згідно з деклараційним патентом України № 62255 А «Спосіб одержання мінеральних добрив», становить 43,7 млн грн за рахунок зменшення енерговитрат і підвищення рівня екологічної безпеки виробництва при забезпеченні викидів амоніаку після системи абсорбції нижче ніж ГДВ та на межі санітарної зони нижче ніж ГДК для населених місць.

7. Проведено агроекологічні та токсиколого-гігієнічні дослідження розроблених марок азотно-фосфорних, складних і органо-мінеральних добрив. Створено методологічну основу науково-обґрунтованого впровадження екологічно безпечних добрив у сільському господарстві України. Позитивні висновки державних випробувань за результатами дозволили провести державну реєстрацію нових видів складних добрив в Укрдержхімкомісії Міністерства екології та природних ресурсів України (Посвідчення про державну реєстрацію, серія А № 00737; Посвідчення про державну реєстрацію, серія В № 00590; Посвідчення про державну реєстрацію, серія Б № 01346; Посвідчення про державну реєстрацію марки А – серія Б №01388, марок Б та В – серія А № 01493), що дозволяє виробляти і застосовувати споживачами нові види екологічно безпечних мінеральних та органо-мінеральних добрив.

8. Розрахований еколого-енерго-економічний ефект з визначенням коефіцієнтів екологічності, які показують переваги запропонованої технології в частині зменшення твердих відходів та пилогазових викидів і енерговитрат на 1 тону продукції та підвищення у два рази коефіцієнту біоенергетичної ефективності

розроблених добрив при застосуванні їх у сільському господарстві і зниженні більше ніж в два рази коефіцієнту екологобезпечного навантаження мінеральних добрив на земельні угіддя. Впровадження у промислове виробництво ОМД показує можливість збільшення обсягів випуску добрив на 1,8 %, поліпшення їх якості з одночасним зниженням собівартості відповідного виробництва. Очікуваний економічний ефект ПАТ «Сумхімпром» під час виробництва амофосу становитиме майже 2 млн грн, складних НРК-добрив – більше 1,3 млн грн і суперфосфату – майже 290 тис грн за 1 рік.

## СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

### *Наукові праці, в яких опубліковані основні наукові результати дисертації:*

1. Оптимальные конструкции полочных аппаратов. Расчёт полочного пневмокласификатора для разделения фосфоритов / Н. П. Юхименко, С. В. Вакал, Н. П. Кононенко [и др.] // Аппараты взвешенного слоя : монография. – Сумы : Собор, 2003. – 175 с.

*Здобувач узагальнив і проаналізував конструкції апаратів та запропоновані методики їх розрахунку.*

2. Вакал С. В. Виробництво фосфоровмісних добрив підприємствами України та їх використання в сільському господарстві / В. Г. Заречений, Е. О. Карпович, С. В. Вакал [та ін.] : монографія. – Суми : Університетська книга, 2004. – 189 с.

*Здобувач визначив екологічні критерії нових видів добрив під час їх виробництва і застосування.*

3. Ассортимент фосфатно-тукової продукції України та шляхи його розширення. Органо-мінеральні добрива / С. В. Вакал, І. М. Астрелін, М. О. Трофименко [та ін.] // Сучасний стан фосфатно-тукової промисловості України : монографія. – Суми : Собор, 2005. – 80 с.

*Здобувач проаналізував переваги та недоліки мінеральних і органо-мінеральних добрив.*

4. Воробьёва И. П. Перспектива развития фосфорных удобрений в Украине / И. П. Воробьёва, В. Г. Зареченный, С. В. Вакал // Хімічна промисловість України. – 2001. – № 2. – С. 3–5.

*Здобувач виклав наукові та промислові обґрунтування доцільності залучення до виробництва добрив нових видів сировини.*

5. Сравнительный анализ фосфорсодержащих минеральных удобрений, производимых на химических предприятиях Украины и Белоруссии / В. Г. Заречений, С. В. Вакал, Т. В. Карпенко, Р. В. Сидоренко // Вісник Сумського державного університету. Серія: Технічні науки. – 2002. – № 9. – С. 140–144.

*Здобувач брав участь у дослідженнях, проаналізував та узагальнив результати.*

6. Пляцук Л. Д. Екологічне обґрунтування вибору сировини для вітчизняного виробництва мінеральних добрив / Л. Д. Пляцук, С. В. Вакал, І. О. Трунова // Вісник Сумського державного університету. Серія: Технічні науки. – 2003. – № 3. – С. 136–138.



*Здобувач дослідив мінералогічний та хімічний склад фосфоровмісних концентратів закордонних родовищ сировини з визначенням екологічних обмежень їх застосування.*

7. Трунова І. О. Екологічні аспекти використання північно-африканських фосфоритів / І. О. Трунова, С. В. Вакал // Вісник Сумського національного аграрного університету. Серія: Механізація та автоматизація виробничих процесів. – 2003. – Вип. 10. – С. 259–263.

*Здобувач визначив хімічний склад фосфоритів та оцінив їх токсикологічні властивості.*

8. Заречений В. Г. Кадмій у фосфоровмісних мінеральних добривах / В. Г. Заречений, С. В. Вакал // Хімічна промисловість України. – 2003. – № 6. – С. 18–20.

*Здобувач визначив і проаналізував уміст кадмію в мінеральних добривах порівняно із закордонними вимогами.*

9. Сирийские фосфориты. Особенности переработки на удобрения / Э. А. Карпович, А. Н. Кий, С. В. Вакал [и др.] // Хімічна промисловість України. – 2004. – № 2. – С. 35–39.

*Здобувач брав участь у дослідженнях і розробив методу їх перероблення.*

10. Хариков А. М. Физико-химические свойства и кинетические исследования алжирских фосфоритов в качестве альтернативного источника сырья для производства аммонизированного суперфосфата / А. М. Хариков, Н. Н. Нишпоренко, С. В. Вакал // Вісник Черкаського Державного технологічного університету. – 2004. – № 4 – С. 109–115.

*Здобувач узагальнив кінетичні закономірності процесів розкладання фосфоритів із виявленням лімітуючих стадій та визначенням швидкості процесів.*

11. Вакал С. В. Розробка екологічно доцільних добрив на основі вітчизняних фосфоритів / С. В. Вакал // Вісник Сумського національного аграрного університету. Серія: Механізація та автоматизація виробничих процесів. – 2004. – Вип. 11. – С. 112–115.

12. Вакал С. В. Современное состояние промышленности минеральных удобрений / С. В. Вакал, Е. В. Скрыльник // Вісник Сумського національного аграрного університету. Серія: Механізація та автоматизація виробничих процесів. – 2005. – Вип. 11. – С. 45–54.

*Здобувач виконав аналіз нових марок мінеральних та органіко-мінеральних добрив.*

13. Пляцук Л. Д. Методы переработки природных фосфатов / Л. Д. Пляцук, С. В. Вакал, Н. И. Андриенко // Вісник Сумського державного університету. Серія Технічні науки. – 2006. – № 5. – С. 108–115.

*Здобувач систематизував технології виробництва основних видів мінеральних добрив.*

14. До питання про використання осадів стічних вод, як сировини для отримання органіко-мінерального добрива / В. І. Тошинський, С. В. Вакал, Н. В. Ракша, Т. І. Печенко // Вісник НТУ «Харківський політехнічний інститут» : збірник наукових праць. Серія: Хімія, хімічна технологія та екологія. – Харків : НТУ «ХПІ», 2006. – № 43. – С. 59–65.

*Здобувач запропонував залучення осадів стічних вод як сировину органо-мінеральних добрив для вирішення екологічної проблеми їх утилізації.*

15. Апатитовый концентрат из руды Кропивненского титано-апатитового месторождения. Перспектива использования в отрасли минеральных удобрений / Э. А. Карпович, А. Е. Золотарёв, С. В. Вакал [и др.] // Хімічна промисловість України. – 2007. – № 4. – С. 30–34.

*Здобувач провів дослідження перспективного виду сировини та видав рекомендації із застосування у виробництві екологічно безпечних вітчизняних апатитових концентратів.*

16. Вакал С. В. Еколого-економічні аспекти застосування органо-мінеральних добрив / С. В. Вакал // Хімічна промисловість України. – 2008. – № 1. – С. 46–48.

17. Юхименко Н. П. Аммонизированный суперфосфат. Основные направления энергосбережения при классификации и охлаждении / Н. П. Юхименко, С. В. Вакал // Хімічна промисловість України. – 2009. – № 6. – С. 50–52.

*Здобувач провів та узагальнив результати досліджень.*

18. Вакал С. В. Визначення теплових ефектів реакцій процесу кислотного розкладання алжирських фосфоритів / С. В. Вакал // Вісник Сумського національного аграрного університету. Серія: Механізація та автоматизація виробничих процесів. – 2010. – Вип. 1. – С. 95–99.

19. Будьонний О. П. Дослідження і розробка технології одержання амофосу із алжирських фосфоритів / О. П. Будьонний, С. В. Вакал // Вісник Сумського державного університету. Серія: Технічні науки. – 2010. – № 3. – Т. 1. – С. 163–166.

*Здобувач виконав аналіз особливостей процесу та узагальнення результатів дослідження технології.*

20. Юхименко Н. П. Пути и методы рациональной переработки зарубежных фосфоритов / Н. П. Юхименко, С. В. Вакал // Екологічна безпека. – 2011. – № 2 (12). – С. 59 – 62.

*Здобувач провів дослідження з визначення дисперсійних характеристик фосфатної сировини.*

21. Юхименко Н. П. Производство сульфата алюминия. Эксергетические аспекты снижения энергозатрат / Н. П. Юхименко, С. В. Вакал // Хімічна промисловість України. – 2011. – № 4. – С. 45–49.

*Здобувач запропонував використання ексергетичного аналізу для визначення енергоефективності технологій.*

22. Производство аммонизированного суперфосфата. Эксергетические аспекты снижения энергозатрат / Н. П. Юхименко, Э. А. Карпович, С. В. Вакал [и др.] // Хімічна промисловість України. – 2012. – № 5. – С. 55–63.

*Здобувач визначив енергетичну ефективність кислотної технології одержання добрив і провів поетапне енергетичне оцінювання ефективності процесу.*

23. Вакал В. С. Фосфоромісні мінеральні добрива. Вітчизняна фосфатна сировина для їх виробництва / В. С. Вакал, С. В. Вакал // Хімічна промисловість України. – 2013. – № 1. – С. 36–39.

*Здобувач визначив види сировини і запропонував варіанти її переробки.*

24. Проблема важких металів при виробництві і використанні фосфоророзмісних мінеральних добрив (на прикладі кадмію, свинцю, арсену) / Т. О. Яструб, В. В. Кірсенко, С. В. Вакал [та ін.] // Медицина праці. – 2013. – № 3 – С. 8–11.

*Здобувач провів дослідження з визначення вмісту важких металів у фосфорній кислоті та фосфогіпсу.*

25. Вакал С. В. Концепція створення екобезпечних мінерально-органічних добрив із використанням як сировини відходів виробництва та місцевих природних ресурсів / С. В. Вакал, М. С. Мальований // Науковий вісник НЛТУ України. – 2016. – Вип. 26.3. – С. 269–273.

*Здобувач запропонував шляхи вирішення завдання створення мінерально-органічних добрив із застосуванням місцевої сировини.*

26. Вакал С. В. Исследование процесса концентрирования фосфорной кислоты, полученной из фосфоритов Каратау / С. В. Вакал, Э. А. Карпович, Х. Х. Тургумбаева // Химический журнал Казахстана. – 2013. – № 1. – С. 104–109.

*Здобувач брав участь у дослідженнях фізико-хімічних процесів концентрування розчинів фосфорної кислоти та узагальненні результатів.*

27. Формирование местной сырьевой базы на основе техногенных отходов Жамбылского региона / Х. Х. Тургумбаева, Т. И. Бейсекова, С. В. Вакал [и др.] // Химический журнал Казахстана. – Алматы, 2013. – № 2. – С. 151–157.

*Здобувач брав участь у дослідженнях, провів аналіз та узагальнення дослідних даних.*

28. Вакал С. В. Исследование минералогического и химического состава и физико-химических свойств фосфатного сырья Ближнего Востока и Северной Африки / С. В. Вакал // Научно-технический журнал «Мир серы N, P и K». – Москва : ОАО «НИУИФ», 2013. – № 2. – С. 25–28.

29. Тургумбаева Х. Х. Исследование и разработка технологии получения сложных фосфорсодержащих удобрений на основе алжирских фосфоритов / Х. Х. Тургумбаева, С. В. Вакал // Химический журнал Казахстана. – Алматы, 2014. – № 1. – С. 156–166.

*Здобувач провів експериментальні дослідження з технології одержання амофосу.*

30. Qualitative indexes of apatite concentrate of ukrainiantitanium-apatite deposits / S. Vakal, J. Adamenko, B. Chivanov [et al.] // Buletin științific al universității de nord din baia mare, SERIA D, Exploataři Miniere Prepararea Substanțelor Minerale Utile Metalurgie Neferoasă Geologie și Ingineria Mediului. – Indexat ProQuest, EBSCO, 2013. – Vol. XXVII, No. 1. – P. 109–116.

*Здобувач провів дослідження та подав наукове і технічне обґрунтування залучення до виробництва добрив апатитової складової українських родовищ сировини.*

31. Development of ammophos production technology from algerian phosphorites / S. Vakal, E. Karpovych, M. Malyovanyi [et al.] // Chemistry & chemical technology. – 2014. – Vol. 8. – Issue 1. Chemical Technology. – P. 89–92.

*Здобувач провів дослідження з одержання амофосу і визначення їх особливостей при застосуванні фосфоритів.*

32. Yukhimenko N. The exergy analysis of energy efficiency of the technology of granulated phosphorus-potassium fertilizers / N. Yukhimenko, S. Vakal // Восточно-европейский журнал передовых технологий. – 2016. – № 5/6 (83). – С. 4–10.

*Здобувачем визначена енергетична ефективність запропонованої безкислотної технології одержання добрив і проведено порівняння з кислотною.*

33. Перспективы развития фосфорных удобрений в Украине / И. П. Воробьева, В. Г. Зареченный, С. В. Вакал [и др.] // Техничко-економический анализ производства фосфорсодержащих удобрений, кормовых фосфатов, серной кислоты, технических солей и неорганических пигментов за 2000 год : сборник. – Сумы : АОЗТ «Арсенал-Пресс», 2001. – С. 56–58.

*Здобувач проаналізував особливості розвитку галузі мінеральних добрив із урахуванням нового виду сировини.*

34. Вакал С. В. Физико-химические показатели минеральных удобрений, разработанных Сумским ГОСНИИ МИНДИП / С. В. Вакал, Т. В. Карпенко, Н. А. Король // Техничко-економический анализ производства фосфорсодержащих удобрений, кормовых фосфатов, серной кислоты, технических солей и неорганических пигментов за 2002 год. – Сумы : Арсенал-Пресс, 2004. – С. 43–67.

*Здобувач узагальнив результати досліджень добрив хімічних виробництв підприємств України.*

35. Юхименко Н. П. Пути и методы рациональной переработки зарубежных фосфоритов / Н. П. Юхименко, С. В. Вакал // Техничко-економический анализ производства фосфорсодержащих удобрений, кормовых фосфатов, серной кислоты, технических солей и неорганических пигментов за 2003 год : сборник. – Сумы : АОЗТ «Арсенал-Пресс», 2004. – С. 40–46.

*Здобувач провів дослідження з визначення фізико-хімічних характеристик фосфатної сировини і оцінив їх придатність до кислотної переробки.*

#### ***Наукові праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації:***

36. Зареченный В. Г. Разработка гибких технологий производства фосфорсодержащих удобрений / В. Г. Зареченный, С. В. Вакал // Вдосконалення процесів та апаратів хімічних та харчових виробництв (ІССЕ-99) : тези доповідей Х Міжнародної конференції. – Львів, 1999. – С. 119–120.

37. Юхименко Н. П. Уменьшение пылегазовых выбросов в производстве гранулированных минеральных удобрений / Н. П. Юхименко, С. В. Вакал // Экология и здоровье человека. Охрана водного и воздушного бассейнов. Утилизация отходов : материалы научно-технической конференции. – Харьков, 1999. – С. 166–167.

38. Трохименко М. О. Розробка технологій одержання екологічно доцільних добрив для підприємств галузі / М. О. Трохименко, С. В. Вакал // Комплексне використання сировини, енерго- та ресурсозберігаючі технології у виробництві неорганічних речовин: збірка наукових праць міжнародної науково-практичної конференції. – Черкаси : Вертикаль, 2004. – С. 9–10.

39. Карпович Э. А. Промышленные испытания одного варианта безотходного производства комплексных удобрений / Э. А. Карпович, С. В. Вакал, А. В. Силич // Экология и здоровье человека. Охрана воздушного и водного бассейнов.

Утилизация отходов, Казантип 2005 : сборник научных статей XIII Международной научно-практической конференции. – Харьков : ГП УкрНТЦ «Энергосталь», 2005. – т. II. – С. 252–253.

40. Вакал С. В. Получение минеральных удобрений с гуматом натрия / С. В. Вакал, Е. В. Скрыльник // Гуминовые кислоты и фитогормоны в растениеводстве : материалы международной конференции, Київ, 12 – 16 июня 2007 г. – К., 2007. – С. 105–106.

41. Вакал С. В. Еколого-економічна ефективність застосування органо-мінеральних добрив / С. В. Вакал // Екологічна безпека: проблеми і шляхи вирішення : збірник наукових статей III Міжнародної науково-практичної конференції. – Алушта, 2007. – Т. 2. – С. 281–284.

42. Вакал С. В. Современное состояние промышленности фосфорсодержащих удобрений / С. В. Вакал // Сучасні проблеми технології неорганічних речовин : збірник наукових праць Дніпродзержинського державного технічного університету. – Дніпродзержинськ, 2008. – Вип. 2(10). – С. 33–36.

43. Vakal S. The study of the processes of concentration of phosphoric acid derived from Karatauphosphorite / S. Vakal / International Conference «Modern Challenges and Decisions of Globalization», 15, July 2013. – New York, 2013. – P. 196–198.

44. Вакал С.В. Екологічна безпека виробництва та застосування добрив на основі вітчизняної фосфатної сировини / С. В. Вакал, М. С. Мальований // Екогеофорум-2017. Актуальні проблеми і інновації : матеріали Міжнародної науково-практичної конференції, 22 – 25 березня 2017 р. – Івано-Франківськ, 2017. – С. 119.

***Наукові праці, які додатково відображають наукові результати дисертації:***

45. Спосіб одержання комплексного добрива : деклараційний патент України № 48573 А / І. П. Воробйова, В. Г. Заречений, С. В. Вакал [та ін.]; № 2001106994; заявл. 15.10.2001 ; опубл. 15.08.2002, Бюл. № 8.

*Здобувач проаналізував та обґрунтував результати, оформив заявки на деклараційний патент.*

46. Спосіб одержання складних добрив 5:11:11 : деклараційний патент України № 51441 А / Е. О. Карпович, І. П. Воробйова, С. В. Вакал [та ін.] ; № 2002042588 ; заявл. 02.04.2002 ; опубл. 15.11.2002, Бюл. 11.

*Здобувач обробив експериментальні дані та сформулював формулу винаходу.*

47. Спосіб одержання складного добрива : деклараційний патент України № 62255 А / Е. О. Карпович, В. Г. Заречений, В. С. Вакал [та ін.] ; № 2003021314 ; заявл. 13.02.2003 ; опубл. 15.12.2003, Бюл. 12.

*Здобувач обробив експериментальні дані та сформулював формулу винаходу.*

48. Спосіб одержання комплексного органо-мінерального добрива : корисна модель № 57307 / С. В. Вакал, О. Є. Золотарьов, Е. О. Карпович, [та ін..] ; № u201007730 ; заявл. 21.06.2010 ; опубл. 25.02.2011, Бюл. 4.

*Здобувач запропонував спосіб отримання комплексного органо-мінерального добрива.*

49. Спосіб одержання гранульованого сульфату амонію : корисна модель № 88126 / А. В. Савчук, Є. А. Філонов, С. В. Вакал [та ін.] ; № a200903412 ; заявл. 09.04.2009 ; опубл. 25.04.2014, Бюл.14.

*Здобувач провів дослідження, виконав аналіз та узагальнив результати, оформив заявку на корисну модель.*

50. Спосіб одержання гранульованого хлористого калію : корисна модель № 104504 / А. В. Савчук, Є. А. Філонов, С. В. Вакал [та ін.] ; № u201505604 ; заявл. 08.06.2015 ; опубл. 10.02.2016, Бюл. 3.

*Здобувач провів дослідження, виконав аналіз та узагальнення результатів, оформив заяву на корисну модель.*

## АНОТАЦІЯ

**Вакал С. В. Науково-теоретичні основи створення нових екологічно безпечних технологічних процесів виробництва фосфоровмісних добрив. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.**

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 21.06.01 – екологічна безпека. – Сумський державний університет Міністерства освіти і науки України, Суми, 2018.

Дисертаційна робота присвячена вирішенню науково-прикладної проблеми розроблення та впровадження технології виробництва екологічно доцільних добрив на основі низькоякісної фосфатної сировини вітчизняних та закордонних родовищ для збалансованого екологічно безпечного землеробства.

На основі системного аналізу розроблена стратегія нових екологічно безпечних технологій фосфоровмісних добрив, що забезпечують раціональне використання природних ресурсів, дотримання форматів запобігання шкідливому впливу на довкілля.

Проведено системні дослідження складу та властивостей вітчизняної та закордонної фосфатної сировини і фізико-хімічних методів її перероблення; за результатами токсиколого-гігієнічних та екологічних досліджень зразків закордонних фосфоритів обґрунтовані критичні показники їх безпечності в Україні: кадмію, свинцю, арсену та ефективної питомої активності природних радіонуклідів.

Процеси кислотного розкладання фосфатної сировини адаптовано для одержання екологічно безпечних фосфоровмісних NP- та NPK-добрив із закордонних фосфоритів; опрацьована технологія одержання екологічно безпечного суперфосфату амонізованого з добавкою гумату натрію.

Досліджено одержання складних добрив безкислотним методом шляхом агломерації українських зернистих фосфоритів напівсухим способом; вивчено високий вміст  $P_2O_5$  засв в фосфоритному борошні, що дозволяє використовувати його як самостійне добриво. Для об'єктивного оцінювання якості використаної теплової енергії технічною системою у виробництві амонізованого суперфосфату кислотним методом та РК-добрива безкислотним методом був складений ексергетичний баланс виробництва і оцінена ефективність кожної стадії; обґрунтована ефективність безкислотного методу.

Розроблено гнучку технологічну схему одержання фосфоровмісних складних добрив; доведено економічну та екологічну ефективність запропонованих технологій.

За результатами агрохімічних та екологічних досліджень фосфоровмісних добрив із вітчизняної та закордонної сировини визначено їх вплив на агрохімічні

показники родючості ґрунту, якість сільськогосподарської продукції та оцінено вміст важких металів у ґрунтах та рослинницькій продукції.

Практична значущість роботи підтверджена результатами промислових випробувань розроблених екологічно безпечних технологій перероблення закордонних і вітчизняних фосфоритів в амонізований суперфосфат та у складні мінеральні добрива кислотним і безкислотним способами; трьома деклараційними патентами України, трьома патентами на корисну модель і актами впровадження у виробничий і навчальний процеси.

**Ключові слова:** екологічна безпека, фосфати, гумати, ексергетичний аналіз, добрива, еколого-економічна ефективність.

## SUMMARY

**Vakal S. V. Scientific and theoretical basis for the creation of new environmentally safe technological processes of phosphorus fertilizers production. – Manuscript.**

Thesis for the academic degree of the Doctor of Engineering Science in specialty 21.06.01 – Ecological safety. – Sumy State University, Ministry of Education and Science of Ukraine, Sumy, 2018.

Dissertation is devoted to solving the scientific-applied problem of the development and introduction of the environmentally sound fertilizers production technologies based on low-quality phosphate raw materials of domestic and foreign deposits for balanced safe agriculture.

On the basis of a system analysis of a strategy of new environmentally safe technologies of phosphate fertilizers ensuring the rational use of natural resources, the observance of formats to prevent harmful effects on the environment was developed.

A systematic research of composition and properties of domestic and foreign raw phosphates and physical and chemical methods of its processing was carried out; their critical safety indicators in Ukraine: cadmium, plumbum, arsenic and effective specific activity of natural radionuclides were justified by the results of toxicological and hygienic and environmental studies of samples of foreign phosphorite.

Acid decomposition of phosphate raw materials processes was adapted to produce environmentally safe phosphorus NP- and NPK-fertilizers from foreign phosphate; the technology for production of ecologically safe ammoniated superphosphate with addition of sodium humate was worked out.

The obtaining of compound fertilizer by acid-free method by Ukrainian grainy phosphates semi-dry agglomeration was explored; the high content of  $P_2O_5$  assim in phosphate flour was studied, that can be used as an independent fertilizer. In order to objectively assess the quality of the used thermal energy by technical system in the production of ammoniated superphosphate by acid method and PK-fertilizer by acid-free method the exergy balance of production was compiled and the effectiveness of each stage was evaluated; the effectiveness of acid-free method was proved.

A flexible technological scheme of the phosphorus compound fertilizer was developed; economic and ecological efficiency of the proposed technologies was proved.

According to the results of agrochemical and environmental studies of phosphate fertilizers with domestic and foreign raw materials their impact on the agro-chemical soil

fertility indicators, the quality of agricultural products was defined and the content of heavy metals in soils and crop production was evaluated.

The practical significance of the work was confirmed by the results of industrial tests of developed environmentally sound technologies for processing of foreign and domestic phosphates in ammoniated superphosphate and compound fertilizers by acidic and acid-free methods, three declarative patents of Ukraine, three patents for utility model and introduction acts in the manufacturing and training processes.

**Keywords:** ecological safety, phosphates, humates, exergy analysis, fertilizers, ecological and economic efficiency.



**ВАКАЛ СЕРГІЙ ВАСИЛЬОВИЧ**

**«НАУКОВО-ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ СТВОРЕННЯ НОВИХ  
ЕКОЛОГІЧНО БЕЗПЕЧНИХ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПРОЦЕСІВ  
ВИРОБНИЦТВ ФОСФОРОВМІСНИХ ДОБРИВ»**

Автореферат дисертації на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук

Спеціальність 21.06.01 – екологічна безпека

Підписано до друку 05.01.2018 р.

Формат 60x90/16. Ум. друк. арк. 1,9. Обл - вид. арк. 1,9. Наклад 120 прим. Замовлення №

**Видавець і виготовлювач**  
Сумський державний університет,  
вул. Римського-Корсакова, 2, м. Суми, 40007  
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи ДК № 3062 від 17.12.2007.