

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЛЬВІВСЬКА ПОЛІТЕХНІКА»**

**Синельніков Сергій Дмитрович**

**УДК 502.56/568:631.812.12**

**ЕКОЛОГІЧНО БЕЗПЕЧНА УТИЛІЗАЦІЯ ВІДХОДІВ  
ПОЛІЕТИЛЕНТЕРЕФТАЛАТУ ВИКОРИСТАННЯМ ЇХ ДЛЯ  
КАПСУЛЮВАННЯ МІНЕРАЛЬНИХ ДОБРІВ**

*Спеціальність 21.06.01 - Екологічна безпека*

**АВТОРЕФЕРАТ**  
дисертації на здобуття наукового ступеня  
кандидата технічних наук

Львів – 2021

Дисертацією є рукопис.  
Робота виконана у Державній екологічній академії післядипломної освіти та управління Міністерства захисту довкілля та природних ресурсів України

**Науковий керівник:**

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

**Офіційні опоненти:**

**Вакал Сергій Васильович**,  
доктор технічних наук, с.н.с.  
Сумський державний університет  
Міністерства освіти і науки України,  
директор Державного науково-дослідного  
інституту мінеральних добрив та  
пігментів, м.Суми

**Леськів Галина Зіновіївна**,  
кандидат технічних наук, доцент,  
Львівський державний університет  
внутрішніх справ Міністерства внутрішніх  
справ України, завідувач кафедри  
менеджменту, м. Львів

Захист дисертації відбудеться 11 лютого 2021 р. о 12:00 годині на засіданні спеціалізованої вченої ради К 35.052.22 в Національному університеті «Львівська політехніка» за адресою: 79013, м. Львів-13, пл.Св.Юра, 3/4, VIII корпус НУ ЛП, аудиторія 105.

З дисертацією можна ознайомитись у науково-технічній бібліотеці Національного університету «Львівська політехніка» за адресою: 79013, м. Львів, вул. Професорська, 1 та на сайті <http://lp.edu.ua/research/disscoun/k-3505222>.

Автореферат розіслано «    » січня 2021 р.

Учений секретар спеціалізованої  
вченої ради К35.052.22,  
д.т.н, доцент.



Сабадаш В.В.

## **ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ**

**Актуальність теми.** Мінеральні добрива є одним із найефективніших і на сьогоднішній день незамінним засобом збільшення урожайності та поліпшення якості окремих параметрів продукції традиційного рослинництва. Застосовуючи мінеральні добрива за науково обґрунтованими рекомендаціями аграрії керують процесом живлення рослин, підвищують якість урожаю та родючість сільськогосподарських рослин, покращують фізико-хімічні та біологічні властивості ґрунту. Згідно даних наукових досліджень вчених - аграріїв науково обґрунтоване застосування мінеральних добрив дозволяє збільшити врожай основних сільськогосподарських культур в середньому на 40 - 50 %. Але існують і негативні наслідки застосування мінеральних добрив - значний вплив на навколишнє природне середовище внаслідок забруднення компонентів агроecosystem елементами живлення, які не засвоїлись рослинами. Незасвоєні рослинами водорозчинні мінеральні солі добрив потрапляють у водойми, а сполуки нітрогену, які легко розкладаються в природніх умовах – ще і в атмосферу у вигляді оксидів нітрогену. Згідно оцінок науковців частка засвоєння рослинами елементів живлення складає біля 0,4 - 0,6. Це означає, що майже половина внесених в ґрунти мінеральних добрив не бере участі у малому біотичному циклі кругообігу, а забруднює агроecosystem. Таким чином, внесення надмірної кількості мінеральних добрив (чого практично неможливо уникнути із позицій забезпечення рослин необхідною кількістю елементів живлення) спричиняє значний негативний вплив на довкілля, рільничу продукцію, фауну а також і на здоров'я населення. Одним із ефективних методів зменшення негативного впливу від застосовуваних мінеральних добрив є використання нових форм – капсульованих добрив із пролонгованою дією. Такі добрива забезпечують вивільнення елементів живлення через оболонку капсули впродовж всього вегетаційного періоду рослин. Одночасно таким методом зменшуються частота та обсяг внесення добрив, запобігається міграція елементів живлення за границі малого біотичного циклу агроecosystem, попереджується потрапляння незасвоєних елементів живлення у інші компоненти агроландшафтів. Масове застосування капсульованих мінеральних добрив гальмується значною вартістю матеріалів капсул та складністю технологій нанесення покриття. Можна було б значно зменшити вартість добрив у випадку застосування як компоненту капсулоутворюючого матеріалу полімерних відходів. У цьому випадку вдалось би не тільки отримати недорогий матеріал для капсулювання, але й вирішити питання утилізації полімерних відходів. Саме такому комплексному підходу: використанню полімерних відходів для створення капсули добрив пролонгованої дії, чим досягається мінімізація екологічної небезпеки від застосування мінеральних добрив та утилізація самих полімерних відходів, присвячені дослідження цієї дисертаційної роботи. Як перспективний полімерний відхід досліджувався модифікований поліетилентерефталат (для позначення якого повсемірно використовується аббревіатура ПЕТ або ПЕТФ).

**Зв'язок роботи із науковими програмами, планами, темами.** Дисертаційна робота відповідає науковому напрямку Державної екологічної

академії післядипломної освіти та управління, основні положення дисертаційної роботи виконувались згідно із програмою Державного фонду охорони навколишнього природного середовища по КПКВК 2401270 «Комплексна реалізація державної екологічної політики, здійснення природоохоронних заходів» (№ держреєстрації 0114U001222). Дисертаційна робота відповідає також науковому напрямку кафедри «Екологія та збалансоване природокористування» Національного університету "Львівська політехніка" «Природоохоронні технології з використанням природних дисперсних сорбентів та мінеральних добрив пролонгованої дії» і виконувалась згідно із тематикою науково-дослідницької роботи НУ «Львівська політехніка» з проблеми "Дослідження та прогнозування ризиків техногенного та природного характеру в контексті сталого розвитку" 0119U103466.

**Мета і завдання дослідження.** Метою дисертаційної роботи є підвищення рівня екологічної безпеки рослинництва застосуванням мінеральних добрив пролонгованої дії, капсульованих модифікованим поліетилентерефталатом.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі завдання:

- провести оцінку можливості застосування полімерних відходів для капсулювання мінеральних добрив;
- визначити технологічні параметри капсулювання гранульованих мінеральних добрив модифікованим ПЕТФ в установці киплячого шару;
- провести тестові дослідження капсульованих добрив згідно методики EN 13266:20;
- дослідити в лабораторних умовах вплив капсульованих ПЕТФ мінеральних добрив на зміну рН ґрунту, мікробіоту ґрунту та кінетику росту тестових рослин;
- провести теоретичний аналіз балансових співвідношень використання різних видів мінеральних добрив в агроєкосистемах та кількість втрат незасвоєних елементів живлення від цих видів мінеральних добрив у довкілля;
- провести польові агроєкологічні дослідження застосування капсульованих ПЕТФ мінеральних добрив в агроєкосистемах таких культур як картопля, соя та кукурудза;
- провести оцінку екологічної та агрономічної ефективності використання мінеральних добрив, капсульованих ПЕТФ.

*Об'єкт дослідження* – явище забруднення агроєкосистем мінеральними добривами.

*Предмет дослідження* – процеси отримання та застосування пролонгованих мінеральних добрив, капсульованих модифікованим поліетилентерефталатом.

**Методи досліджень** включають в себе розроблені та апробовані методики експериментальних досліджень: для визначення вмісту компонентів у рідинних середовищах застосовувалась кондуктометрія; для модифікування ПЕТФ – реалізація реакції алкоголізу; для капсулювання частинок добрива – метод киплячого шару; для встановлення зміни рН в ґрунті в процесі вивільнення елементів живлення із рослин – рН - метрія; для досліджень впливу

мінеральних добрив на мікробіоту – електронна мікроскопія. Коректність результатів підтверджувалась 4-х кратною повторюваністю експериментальних та польових досліджень. Оцінку достовірності та інтерпретацію результатів проводили за допомогою математичного моделювання та статистичного аналізу. Для аналізу отриманих даних застосовувався програмний пакет Microsoft Office Excel 2013.

**Наукова новизна одержаних результатів.** З ціллю підвищення рівня екологічної безпеки агроєкосистем дисертантом отримані такі найбільш важливі наукові результати:

- Вперше теоретично та експериментально доведено перспективність синтезу капсульованих мінеральних добрив із використанням як капсулостворюючої композиції модифікованого ПЕТФ, що дозволило отримати новий вид агрономічно ефективного та екологічно безпечного капсульованого добрива пролонгованої дії та утилізувати полімерні відходи, які створюють небезпеку для довкілля;
- Вперше експериментально досліджено позитивний вплив створених капсульованих ПЕТФ мінеральних добрив на зміну рН ґрунтів та мікробіоту ґрунту, що підтверджує біологічну безпечність нового виду добрива;
- Вперше теоретично та експериментально досліджена гідродинаміка та тепломасообмін процесу капсулювання мінеральних добрив ПЕТФ в установці киплячого шару, що дозволило встановити значення коефіцієнтів, необхідних для розрахунку промислового процесу.
- Набули подальшого розвитку дослідження щодо мінімізації негативного впливу капсульованих мінеральних добрив на довкілля.

**Практичне значення одержаних результатів.** Аналіз даних експериментальних досліджень дав змогу розробити та запропонувати для впровадження спосіб отримання нового виду полімерної дисперсії для капсулювання мінерального добрива пролонгованої дії, капсульованого ПЕТФ. На полімерну дисперсію отримано патент України. Результати досліджень передані в Сумський державний науково-дослідний інститут мінеральних добрив та пігментів, що підтверджується відповідним актом. Наукові та практичні результати дисертаційної роботи використані у лекційному курсі з дисципліни «Агроєкологія» для студентів спеціальності 101 «Екологія», тема 7 «Методи і заходи екологізації галузей АПК України. Екологічні аспекти» та в програмі практичних занять цього курсу, а також в дисципліні «Техноєкологія», тема 12. «Агропромисловий комплекс» для спеціальностей 101 «Екологія» та 183 «Технології захисту навколишнього середовища» в Національному університеті «Львівська політехніка».

**Особистий внесок здобувача.** Здобувачем особисто опрацьовано літературні джерела за темою дисертації, розроблено методологію дослідження, проведено моніторингові, лабораторні та польові дослідження, систематизовано й узагальнено експериментальний матеріал, сформульовано науково обґрунтовані висновки, підготовлено патент на корисну модель України. Постановка задач, розроблення методик дослідження процесів та технологій

мінімізації екологічної небезпеки, обговорення поставлених задач проводились під керівництвом та за участю д.т.н., проф., Заслуженого діяча науки і техніки України Мирослава Мальованого, зав.кафедри екології та збалансованого природокористування екології та збалансованого природокористування, д.т.н., проф. Олега Нагурського, зав.кафедри цивільної безпеки Національного університету «Львівська політехніка», та Івана Тимчука, к.с.-г.н., асистента кафедри екології та збалансованого природокористування Національного університету «Львівська політехніка».

**Апробація результатів дисертації.** Основні положення та результати дисертаційної роботи доповідалися, обговорювалися і були схвалені на таких міжнародних та всеукраїнських наукових конференціях: V-й Всеукраїнський з'їзд екологів з міжнародною участю (Екологія / Ecology) (26-26 вересня 2015 р. Вінниця); 4-й міжнародний конгрес «Захист навколишнього середовища. Енергоощадність. Збалансоване природокористування» (21-23 вересня 2016 р. Львів); 5-й Міжнародний конгрес захист навколишнього середовища. Енергоощадність. Збалансоване природокористування. (26–29 вересня 2018 р. Львів); VII-й Всеукраїнський з'їзд екологів з міжнародною участю (Екологія / Ecology) (25–27 вересня 2019 р. Вінниця); XIII Міжнародної науково-технічної конференції «Проблеми екології та енергозбереження» (20–22 вересня 2019 р. Миколаїв); Всеукраїнської науково-методичної конференції «Управління якістю підготовки фахівців» (28-29 березня 2019 р. Одеса); XVII міжнародної науково-технічної конференції «Проблеми екологічної безпеки» (02-04 жовтня 2019 р. Кременчук); Міжнародної науково-практичної конференції «Сучасний стан і перспективи розвитку ландшафтної архітектури, садово-паркового господарства, урбоекології та фіто меліорації» (4-5 квітня 2019 р. Львів); II міжнародного наукового симпозіуму «Сталий розвиток – стан та перспективи» (12-15 лютого 2020 року, Львів-Славське); I міжнародної науково-практичної конференції «Авіація, промисловість, суспільство» (14 травня 2020 р., Кременчук); VI міжнародної науково-практичної конференції «Інноваційні технології в архітектурі і дизайні» (21 - 22 травня 2020 р., Харків); Міжнародної наукової конференції молодих вчених «Регіональні проблеми охорони довкілля» (1 - 3 червня 2020 р., Одеса).

**Публікації.** За матеріалами дисертації опубліковано 23 друковані наукові праці, в тому числі 2 публікації у виданнях, що входять до наукометричних баз даних (Scopus), 5 статей у фахових виданнях із технічних наук, 2 публікації у колективних монографіях, 1 стаття у інших виданнях, 12 тез доповідей на міжнародних наукових конференціях та 1 деклараційний патент України на корисну модель.

**Структура та обсяг дисертаційної роботи.** Дисертаційна робота складається зі вступу, 5 розділів, висновків, списку використаної літератури та додатків. Матеріали дисертаційної роботи викладено на 186 сторінках машинописного тексту, ілюстровано 50 рисунками, текст містить 18 таблиць, у бібліографії наведено 259 літературних джерела, дисертація містить 4 додатки.

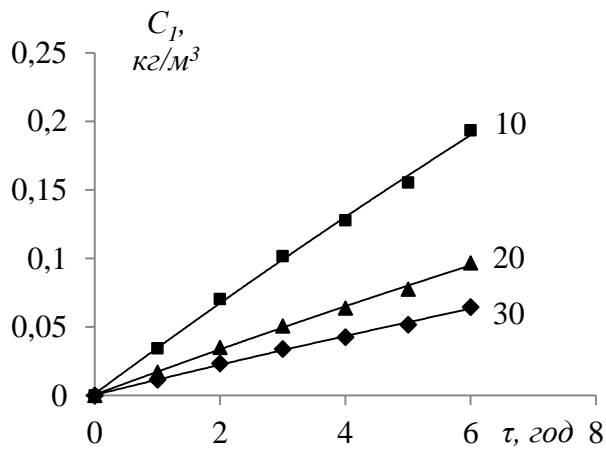
## ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обґрунтована актуальність завдання, яке розв'язується у дисертаційній роботі, сформульовано мету та завдання дослідження, охарактеризовано наукову новизну та практичне значення одержаних результатів, наведено відомості щодо апробації роботи.

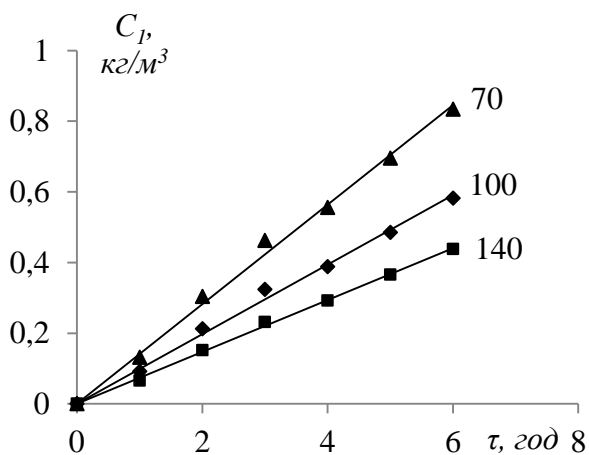
**Перший розділ** присвячений аналізу науково-технічної літератури стосовно проблем забруднення агроecosистем мінеральними добривами, зокрема детально аналізується негативний вплив мінеральних добрив на агроecosистеми та його наслідки. Капсулювання добрив полімерними плівками розглядається як метод зменшення забруднення незасвоєними рослинами елементів живлення агроecosистемами та метод утилізації пластикових відходів. Аналізуються області використання пластмасових виробів, моніторинг локалізації відходів ПЕТФ - пластику та перспективні технології його утилізації. На основі аналізу цієї інформації сформульовані цілі та завдання досліджень.

У другому розділі наведена характеристика об'єкту досліджень, методів та методик досліджень. Запропонована логічно-структурна схема дисертаційних досліджень. Приведені характеристики матеріалів, які використовувались у дослідженнях: поліетилентерефталату, амонію нітрату (аміачної селітри), нітроамофоски. Описана методика експериментальних досліджень: методика та апаратура проведення досліджень процесу вивільнення цільового компоненту; методика визначення проникності полімерних матеріалів; методика модифікування ПЕТФ - відходів; методика покриття твердих частинок в апараті киплячого шару та методика дослідження тепломасообміну в цьому апараті; методика лабораторних досліджень впливу капсульованих мінеральних добрив на біоценоз; методика дослідження впливу мінеральних добрив на рН ґрунту та на мікробіоту ґрунту. Описана методика та послідовність досліджень впливу мінеральних добрив на кінетику росту тестових рослин. Детально описана методика польових досліджень.

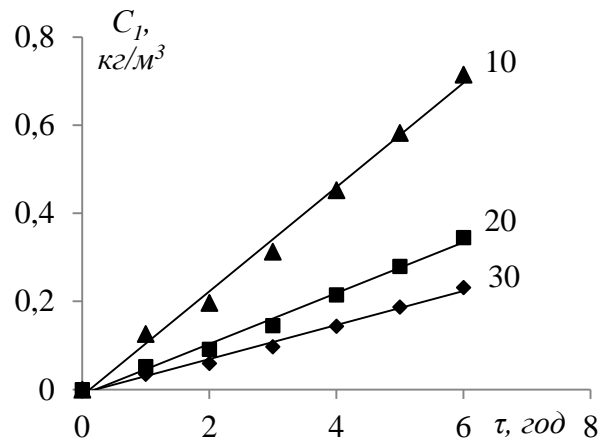
**Третій розділ** присвячено еколого-технологічним аспектам утилізації відходів ПЕТФ у виробництві капсульованих мінеральних добрив. Основним параметром, який визначає тривалість вивільнення елементів мінерального живлення за дифузійним механізмом, є проникність покриття. Ця величина залежить від коефіцієнту внутрішньої дифузії матеріалу оболонки та її товщини. Полімерна оболонка капсульованого добрива не є носієм елементів живлення і розглядається як баласт. У такому разі логічним є нанесення оболонки мінімальної товщини. Мінімальна товщина оболонки, яка може відповідати своєму функціональному призначенню, визначається фізико-хімічними властивостями плівкоутворювача та параметрами обладнання. Проводились дослідження дифузії розчину амонію нітрату через полімерну плівку різної товщини  $\delta$  (мкм), створену різними типами полімерів. Результати експериментальних досліджень представлені графічно у виді залежностей концентрації амонію нітрату ( $\text{кг/м}^3$ ), який продифундував через полімерну плівку різної товщини у дистильовану воду від часу процесу  $\tau$ , год (рис.1).



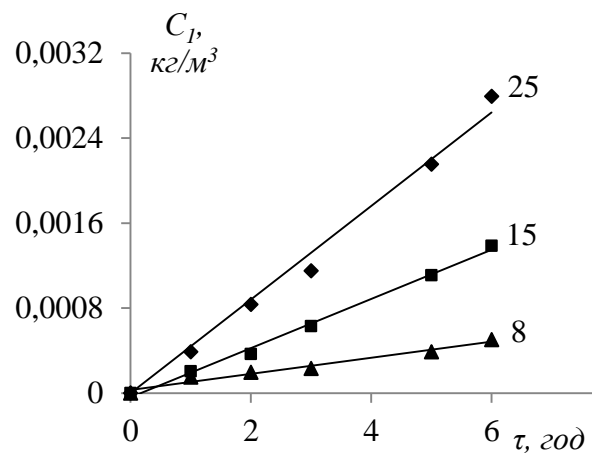
Поліетилен



Поліетилентерефталат



Поліпропілен



Полівінілхлорид

Рисунок 1 – Результати експериментальних досліджень дифузії розчину амонію нітрату через полімерну плівку різної товщини.

Коефіцієнт дифузії  $D$  визначали із рівняння:

$$\frac{dM}{d\tau} = \frac{D}{\delta} F(C_s - \bar{C}) \quad (1)$$

де  $\delta$  – товщина полімерної плівки, м;  $F$  – площа полімерної плівки, через яку дифундує розчин солі, м<sup>2</sup>;  $C_s$  – концентрація насичення солі, кг/м<sup>3</sup>;  $\bar{C}$  – середня концентрація солі у воді за час досліджень, кг/м<sup>3</sup>;  $\tau$  – час процесу, с.

Середні значення отриманих коефіцієнтів дифузії амонію нітрату через різні типи полімерних плівок наведені у таблиці 1.

Таблиця 1 - Значення коефіцієнту дифузії  $NH_4NO_3$  через полімерні плівки

Тип полімеру	Коефіцієнт внутрішньої дифузії, $D$ (м <sup>2</sup> /с)
Поліетилентерефталат	$7,4 \cdot 10^{-12}$
Поліпропілен	$2,8 \cdot 10^{-12}$
Поліетилен	$8,3 \cdot 10^{-13}$
Полівінілхлорид	$2,7 \cdot 10^{-14}$



Аналіз отриманих результатів показує, що ці види полімерних відходів можуть бути використані як основа плівкотвірних композицій для створення капсульованих гранульованих мінеральних добрив різної тривалості дії, для випадку нанесення оболонки товщиною  $\delta \approx 10 \div 50$  мкм:

- поліетилентерефталат – до 3-х місяців;
- поліпропілен – 3 місяці;
- поліетилен – від 6 до 9 місяців;
- полівінілхлорид – більше 9 місяців.

Полімерні матеріали, які застосовуються як основа плівкотвірних композицій повинні відповідати двом основним умовам:

- забезпечувати відповідну інтенсивність вивільнення компонентів мінерального живлення;
- бути безпечними для довкілля – після вивільнення компонентів добрива матеріал оболонки для уникнення забруднення ґрунтового середовища полімерами повинен бути певним чином знешкоджений.

Цим умовам міг би відповідати ПЕТФ за умови забезпечення його розчинності, що відіграє вирішальну роль у процесі створення плівкотвірної композиції та нанесення покриття на гранули мінеральних добрив. Адже для ПЕТФ система роздільного збору (використані ПЕТФ – пляшки) та утилізації (вторинна сировина для виробництва волокна, ПЕТФ - пляшок, листів для термоформування, обв'язочної стрічки і т.п.) широко розвинута в Україні та інших країнах світу. Для досягнення розчинності ПЕТФ у етилацетаті проводилось модифікування ПЕТФ шляхом реалізації реакції алкохолізу із використанням як реагенту диетиленгліколю. В результаті досягається розчинність модифікованого ПЕТФ у етилацетаті, достатня для реалізації технологічного процесу капсулоутворення в апараті киплячого шару. Для досліджень використовувались відходи ПЕТФ у виді пластівців, які пройшли первинну переробку на спеціалізованому підприємстві, та диетиленгліколь (ДЕГ) у мольному співвідношенні ПЕТФ : ДЕГ = 1:0,5, які завантажувались у герметичний реактор. Вміст реактора нагрівали до температури 493К, через 2 години після досягнення необхідної температури вмикали вакуум-насос і здійснювали відгонку етиленгліколю із реактора за значення залишкового тиску 20кПа. Загальна тривалість процесу складала 3,5год. У результаті витіснення етиленгліколю диетиленгліколем отримуємо продукт, розчинний у етилацетаті.

Розрахунок кінетики вивільнення елементів мінерального живлення із частинок капсульованої нітроамофоски різної маси проводився із використанням математичної моделі Гумницького – Нагурського. Вихідні дані та результати розрахунків наведені у таблиці 2. Порівняння теоретичних та дослідних результатів для частинок нітроамофоски різної маси, капсульованих полімерною оболонкою на основі модифікованого поліетилентерефталату, наведені на рис. 2. Відносна похибка експериментальних та теоретичних значень лежить в межах  $3,0 \div 15,1\%$ . Це підтверджує адекватність застосованої математичної моделі процесу вивільнення елементів мінерального живлення із одиночної частинки нітроамофоски, капсульованої плівкою із модифікованого

Таблиця 2. - Кінетичні коефіцієнти дифузійного вивільнення компонентів нітроамофоски із полімерної капсули

№	$M_q \times 10^6$ , кг	$M_n \times 10^6$ , кг	$\delta \cdot 10^6$ , м	$k \times 10^8$ , м/с	$D_2 \times 10^{12}$ , м <sup>2</sup> /с	$\bar{D}_2 \times 10^{12}$ , м <sup>2</sup> /с
1.	29	2,9	0,00021	1,52311	3,16	2,80708
2.	20	2,0	0,00016	1,65161	2,65	
3.	11	1,1	0,00014	1,8333	2,61	

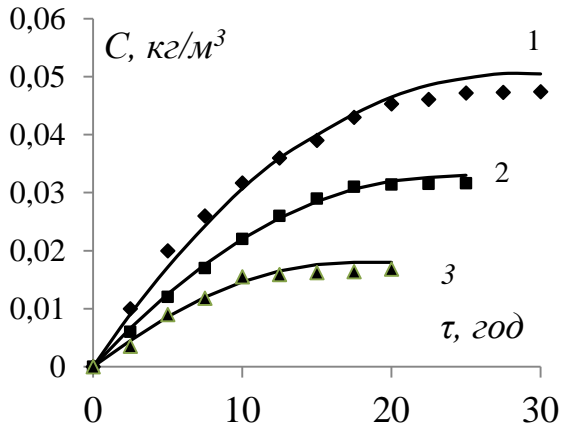


Рисунок 2 - Порівняння теоретичних (лінії) та експериментальних (точки) даних кінетики вивільнення елементів мінерального живлення з частинок капсульованої нітроамофоски різної маси, мг: 1 – 29, 2 – 20, 3 – 11

циліндричного типу періодичної дії. Такі апарати є ефективними під час капсулювання матеріалів, схильних до злипання.

Визначальним технологічним параметром процесу капсулювання є швидкість та напір повітря, за якої шар твердого матеріалу буде перебувати у стані стійкого псевдозрідження. Мінімальне (критичне) значення швидкості  $w_{кр}$  (м/с), за якої шар матеріалу переходить у псевдозріджений стан, визначались за допомогою критеріальних залежностей:

$$Re_{кр} = \frac{w_{кр} d}{\nu_c}; Re_{кр} = \frac{Ar}{1400 + 5,22\sqrt{Ar}}; Ar = \frac{d^3 \rho_c g}{\nu_c^2 \rho_c} \quad (1)$$

де  $d$  – діаметр частинки, м;  $\nu_c$  – кінематичний коефіцієнт в'язкості повітря, м<sup>2</sup>/с;  $\rho_c$  – густина повітря за умов процесу, кг/м<sup>3</sup>;  $\rho_c$  – густина матеріалу частинки, кг/м<sup>3</sup>;  $Re$  та  $Ar$  – критерії Рейнольдса та Архімеда відповідно.

У результаті проведених розрахунків отримані такі значення швидкості повітря (м/с): аміачна селітра  $w_{ac} = 5,6$ ; нітроамофоска  $w_{наф} = 6,1$ . Ці величини були використані у подальшому для розрахунків, як встановлені експериментально технологічні параметри процесу капсулювання.

Отримані в результаті теоретичного аналізу із використанням експериментальних даних рівняння для розрахунку зміни гідравлічного опору шару матеріалу у стані псевдозрідження в умовах зрошення у залежності від

поліетилентерeftалату та визначення коефіцієнту дифузії всередині оболонки із використанням моделі Гумницького – Нагурського.

В четвертому розділі приведені результати технологічних досліджень, описуються технологічні рішення в процесі капсулювання мінеральних добрив оболонкою на основі модифікованого ПЕТФ.

Капсулювання гранульованих добрив полягає у нанесенні на їх поверхню полімерної оболонки методом напилення рідкого плівкоутворювача на шар частинок. Для забезпечення якісного покриття частинки у шарі повинні постійно перемішуватися. Для капсулювання використовувався апарат псевдозрідженого шару

витрати рідини та величини критерію  $Re_z$  (для газової фази) для досліджуваних базових добрив приведені у таблиці 3

Таблиця 3 - Рівняння залежності гідравлічного опору шару добрива в умовах зрошення розчином плівкоутворювача

№	Речовина	Рівняння залежності $\Delta P = f(w, Vp)$
1.	Нітроамофоска	$\frac{\Delta P_p}{\Delta P_c} = 1 + (2,254 - 6 \cdot 10^{-5} Re_r) \frac{w_p}{w}$
2.	Аміачна селітра	$\frac{\Delta P_p}{\Delta P_c} = 1 + (2,002 - 7 \cdot 10^{-5} Re_r) \frac{w_p}{w}$

де  $\Delta P_p$ ,  $\Delta P_c$  – опір, відповідно, зрошеного та сухого шару матеріалу, Па;  $w_p$  – швидкість рідини на виході із розпилюючого пристрою, м/с.

В результаті проведених експериментальних досліджень тепло- та масообміну процесу капсулювання добрив визначені числові значення коефіцієнтів тепловіддачі  $\alpha$  та коефіцієнтів масовіддачі  $\beta$ , які дали змогу встановити необхідне значення витрати плівкоутворювача.

За отриманими технологічними параметрами здійснювали капсулювання гранульованих добрив у апараті циліндричного типу періодичної дії. Величина покриття становила 10% і 20% від маси добрив, що відповідає таким середнім товщинам півки на поверхні частинок ( $10^{-5}$  м): аміачна селітра – 5,74 і 11,48; нітроамофоски – 5,23 і 10,46. Розчинність отриманих добрив перевіряли експериментально кондуктометричним методом, згідно вимог Європейської норми EN 13266:2001. Перевірку якості капсулювання контролювали за характером кривої вивільнення. Результати досліджень у графічному виді наведені на рис.3.

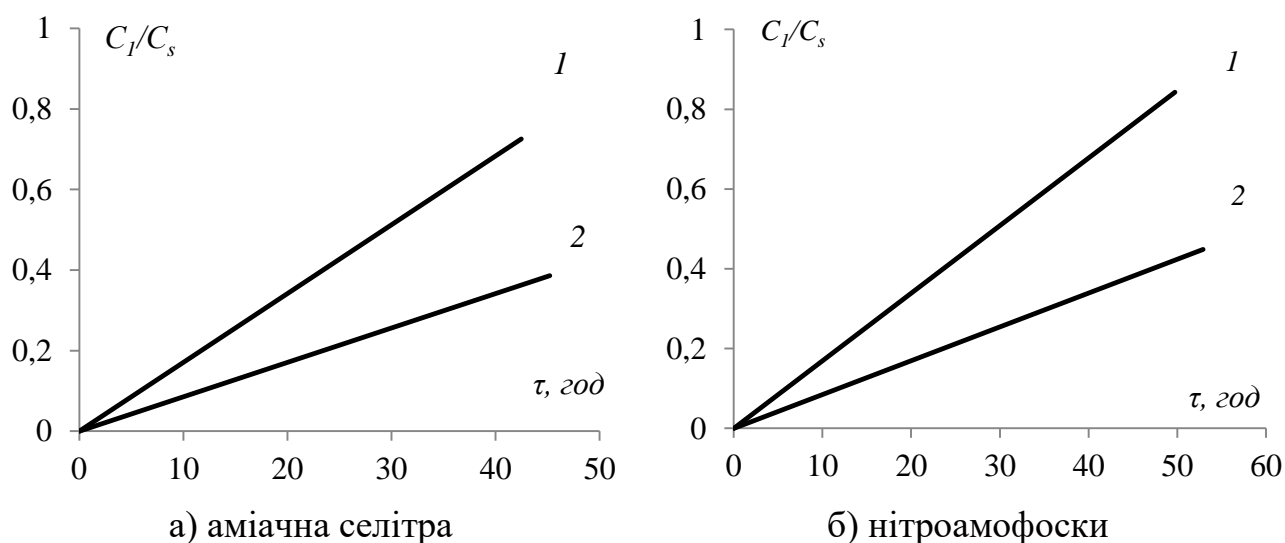


Рисунок 3 – Кінетика розчинення капсульованих добрив, покритих оболонкою на основі модифікованого ПЕТФ різної товщини (% мас): 1 – 10, 2 – 20

Отримані результати (рис.3) вказують, що кінетичні криві розчинення мають прогнозований характер, процес проходить плавно без різких спадів чи

підйомів. Це слугує доказом отримання рівномірного, якісного покриття, яке дає можливість виробляти мінеральні добрива подовженої дії із необхідним часом вивільнення.

**П'ятий розділ** присвячений агроекологічним дослідженням. Результати досліджень впливу капсульованих ПЕТФ мінеральних добрив на зміну рН ґрунту приведені у таблиці 4.

Таблиця 4 - Кінетика зміни рН водної фази зразків ґрунту протягом 28 днів після додавання добрива

Доба \ Зразок	0	1	7	14	21	28
Добриво + Ґрунт	7.02±0.03	6.98±0.05	6.88±0.07	6.68±0.06	6.61±0.06	6.74±0.08
Добриво + Райґрас	6.97±0.02	6.99±0.04	6.85±0.05	6.70±0.07	6.64±0.05	6.71±0.09
Добриво + Ячмінь	7.01±0.04	7.00±0.06	6.87±0.06	6.72±0.09	6.65±0.06	6.70±0.05
Ґрунт	7.05±0.03	6.99±0.07	7.06±0.05	7.08±0.08	6.98±0.07	7.08±0.08
Райґрас	6.99±0.05	7.02±0.05	7.09±0.09	7.02±0.05	7.02±0.08	6.95±0.09
Ячмінь	6.98±0.04	6.98±0.05	7.00±0.08	7.04±0.06	7.00±0.06	7.01±0.07

На 7-й день експерименту рН ґрунту із добривом дещо знизився і на 14 – 28 день експерименту рН зразків із добривом був дещо нижчий, ніж зразків без добрива. Зниження рН ґрунтових зразків із добривом в порівнянні із контрольними зразками є ознакою поступового вивільнення компонентів добрива та є позитивним фактором, оскільки слабко-кисле значення рН ґрунту є оптимальним для розвитку більшості культур. Як результат дотримання такого рівня рН підвищується доступність поживних речовин для рослин.

Проводились дослідження впливу мінеральних добрив на мікробіоту ґрунту. Для приготування мікроскопічних препаратів методом Виноградського з середньої ґрунтової проби відважували 10 г ґрунту, розтирали у ступці та перемішували із 90 мл стерильної дистильованої води протягом 10 хв. Ґрунтову суспензію відстоювали для осадження грубих частинок та виготовляли із неї серію розведень. Мікропрепарати виготовляли із 0,01 мл ґрунтових суспензій, підсушували, фіксували 96 % етиловим спиртом та фарбували карболовим еритрозином протягом 30 хв. Кількість бактерій у ґрунті визначали прямим підрахунком під мікроскопом *MICROmed Fusion S-7620* із використанням імерсійної системи в 100 полях зору окуляра мікроскопа.

Як видно із рисунку 4, що ілюструє залежність приросту загальної кількості мікроорганізмів від тривалості експерименту, приріст мікроорганізмів у зразках ґрунту без добрива, як і у зразку ґрунт-добриво сповільнювався, у порівнянні із іншими зразками з рослинами та рослинами і добривом.

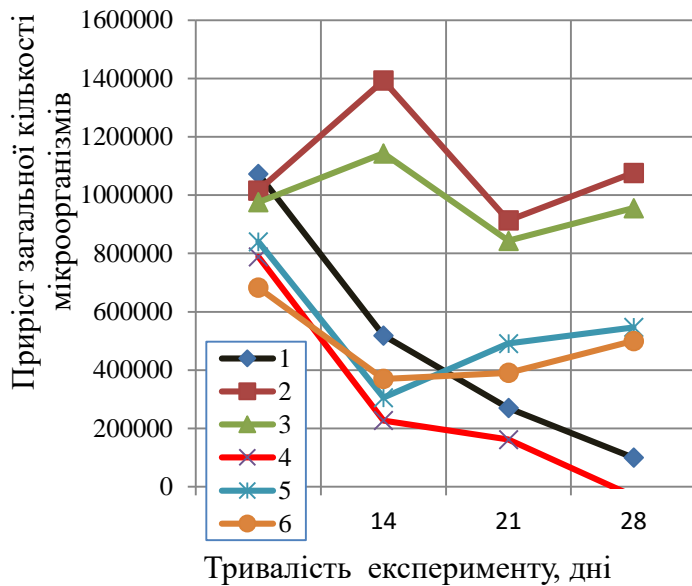


Рисунок 4 - Приріст загальної кількості мікроорганізмів в 1г ґрунту протягом 28 днів: 1 - Добриво + Грунт; 2 - Добриво + Грунт+Райграс пасовищний; 3 - Добриво + Грунт+Ячмінь посівний; 4 - Грунт, 5 - Грунт+Райграс пасовищний; 6 - Грунт+Ячмінь посівний.

У дослідження впливу мінеральних добрив на кінетику росту тестових рослин добрива вносили одноразово під час сівби культури. Дослід включав 3 варіанти:

1. Контроль (без добрив);
2. Нітромофоска (N:P:K = 16:16:16);
3. Капсульоване ПЕТФ добриво.

В горщечки, об'ємом  $1 \cdot 10^{-4} \text{ м}^3$ , висівали крес-салат. Температурний режим під час вегетації коливався від 13 до 19°C. Продовж вегетації виконували догляд та спостереження за рослинами (прорідження, розпушування ґрунту, поливання  $0,075-0,15 \text{ кг/м}^3$ ). Регулярно відмічали (фотографували) та порівнювали розмір наземної частини рослин, їх розвиток та масу. За результатами дослідження робили висновки щодо ефективності застосування капсульованих добрив. Графічна інтерпретація результатів експерименту приведена на рис.5.

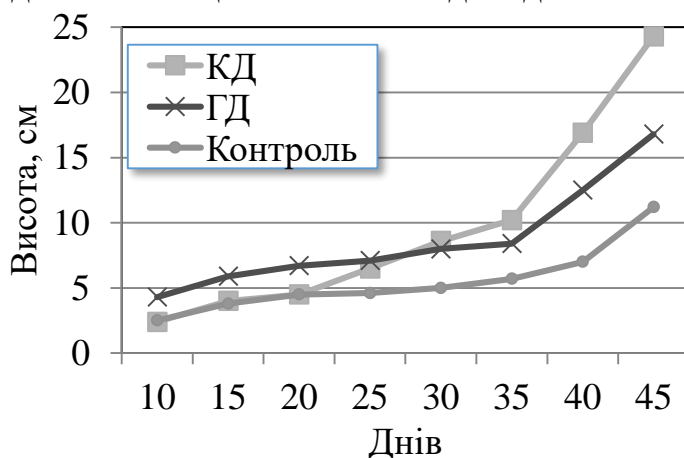


Рисунок 5 - Кінетика росту крес-салату в залежності від типу добрив, які застосовували: ■ - капсульоване добриво × - гранульоване добриво; ● - контроль (без добрив).

Очевидно інтенсивне проростання рослин під впливом добрива зумовлювало активний фотосинтез та виведення органічних речовин, що є субстратами для розвитку великої кількості мікроорганізмів. Ймовірною причиною менш активного приросту кількості мікроорганізмів у зразках з рослинами, але без добрив, є менш інтенсивні в цих умовах проростання та розвиток рослин, і відповідно, менш інтенсивна секреція органічних речовин продуктів фотосинтезу, що поступали у ґрунт менш активно. Встановлено, що мікрофлора ґрунтових асоціацій зразків різноманітна та представлена кокоподібними, бацилярними та розгалуженими формами.

Дані досліджень свідчать про те, що капсульоване добриво показало себе краще, ніж звичайне гранульоване. Це можна пояснити тим, що у випадку застосування гранульованих добрив значна їх частина вимивається, спричиняючи нестачу поживних речовин у субстраті. А капсульовані добрива завдяки здатності пролонгації, вивільняли елементи живлення повільніше і це давало змогу рослині в більш повній мірі засвоїти їх. Рослини рівномірно розвивалися протягом всієї вегетації, а у випадку застосування гранульованого добрива ми спостерігали на початковому етапі скачок в рості рослини і її видовження.

Згідно даних попередніх досліджень, середні значення відсотків корисного використання (як елементів живлення) різних видів добрив у агроекосистемах складає:

- для азотних добрив – 50 – 60 %;
- для фосфорних добрив - 75 – 90 %;
- для калійних добрив – 60 – 80 %.

Із врахуванням відомої інформації щодо втрат у агроекосистемах елементів живлення від гранульованих та капсульованих мінеральних добрив, нами складена балансова схема впливу різних видів добрив на агроекосистеми, яка приведена на рис.6.

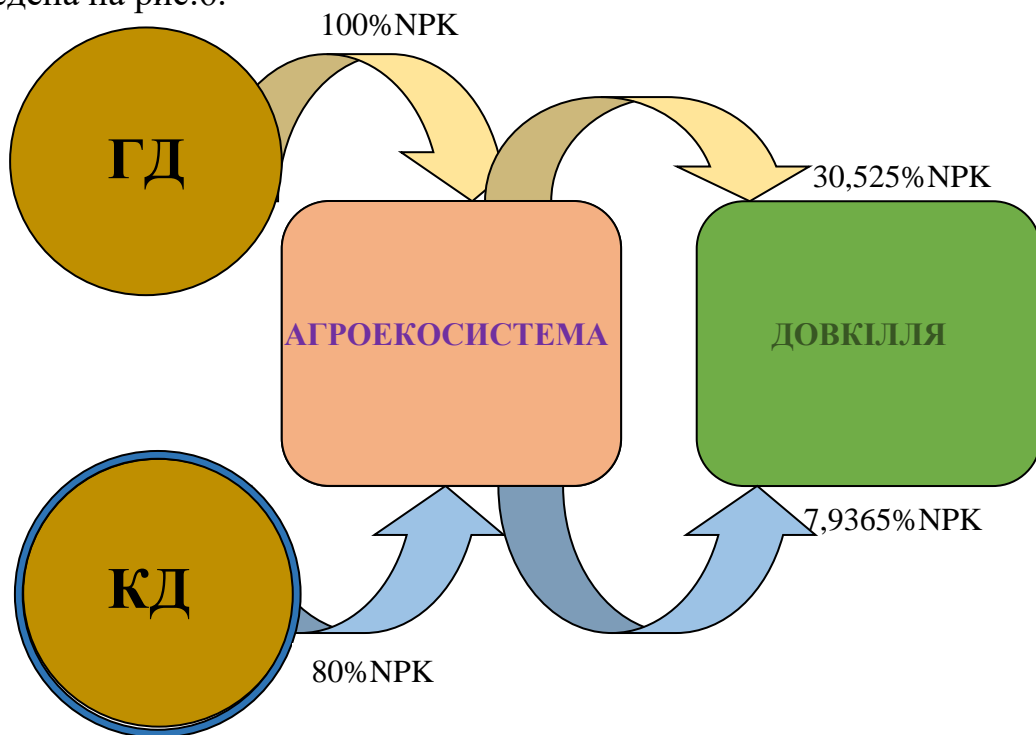


Рисунок 6 - Балансова схема впливу різних видів добрив на довілля.

Як видно із проведених розрахунків, у випадку використання капсульованих добрив замість гранульованих, забруднення довілля залишковими, незасвоєними рослинами добривами зменшується майже в 4 рази.

Проводились польові дрібноділянкові дослідження впливу мінеральних добрив, капсульованих ПЕТФ, на агроєкосистеми картоплі сорту Щедрик, сої сорту Іванка та кукурудзи гібриду Делітоп. За результати досліджень проводилась оцінка екологічної та агрономічної ефективності використання мінеральних добрив, капсульованих ПЕТФ.

Для оцінки екологічної ефективності добрива використовувався показник, який характеризує зменшення втрат добрива у порівнянні із традиційним (гранульованим). Для оцінки агрономічної ефективності дії нами був використаний такий показник, як ефективність дії добрива, розрахунок якого проводився згідно формули

$$k_{ef} = \frac{UP - UP_0}{G_{d.p.}}, \quad (2)$$

де  $K_{ef}$  – коефіцієнт ефективності використання добрива, (тонн урожаю/тонн діючої речовини);  $UP_0$  – урожайність у базовому варіанті (контроль, без застосування будь-яких добрив), т/га;  $UP$  – урожайність за умови внесення певного типу добрив, т/га;  $G_{d.p.}$  – кількість внесеної діючої речовини добрива певного типу, т.

Коефіцієнт ефективності використання добрива за суттю є характеристикою ефективності використання діючої речовини добрива – кількістю діючої речовини, затраченої на одиницю приросту врожаю. У оцінці не враховане покращання якості урожаю, яке фіксувалось для всіх досліджуваних сільськогосподарських культур.

Результати оцінки екологічної та агрономічної ефективності застосування капсульованих мінеральних добрив приведена в табл.5.

Таблиця 5 – Оцінка екологічної та агрономічної ефективності добрив

№	Культури	Зменшення втрат елементів живлення у агроєкосистемі із КД в порівнянні із ГД, %/га	$K_{ef}$ , т урожаю/т діючої речовини	
			ГД	КД
1	Картопля	74	11,5	20,8
3	Соя	47,5	1	4,4
4	Кукурудза	47,5	4,5	7,5

Результати, приведені в табл.5, свідчать, що у випадку вирощування картоплі та використання для цього капсульованих ПЕТФ мінеральних добрив, забруднення довкілля від незасвоєних рослинами елементів живлення (екологічна ефективність застосування КД) зменшується на 74% у порівнянні із застосуванням для цього гранульованих добрив. Одночасно значно зростає агрономічна ефективність використання капсульованих мінеральних добрив. Внесення 1 т. діючої речовини добрив в капсульованому виді спричиняє підвищення урожайності картоплі в порівнянні з контролем до 20,8 т, тоді як для гранульованих добрив цей показник складає 11,5 т.

У випадку вирощування сої та кукурудзи та використання для цього капсульованих ПЕТФ мінеральних добрив, забруднення довкілля від незасвоєних рослинами елементів живлення (екологічна ефективність

застосування КД) зменшується на 47,5 % у порівнянні із застосуванням для цього гранульованих добрив. Агрономічна ефективність для цих культур у випадку використання капсульованих добрив складає:

- для вирощування сої. Внесення 1 т. діючої речовини добрив в капсульованому виді спричиняє підвищення урожайності сої до 4,4 т (для гранульованих добрив врожайність підвищується до 1 т.).
- для вирощування кукурудзи. Внесення 1 т. діючої речовини добрив в капсульованому виді спричиняє підвищення урожайності кукурудзи до 7,5 т (для гранульованих добрив цей показник складає 4,5 т.).

Слід ще врахувати, що у випадку використання капсульованих добрив значно зменшується потреба у діючій речовині – на 20%. Якщо допустити, що капсульованими добривами вдалось би замінити всі використовувані добрива в Україні (що звичайно можливе тільки у далекій перспективі), то можна було б на 20% скоротити виробництво цих добрив, а відповідно зменшити використання природних ресурсів, зменшити масштаби виробництва і відповідно масштаби забруднення довкілля від цього виробництва.

Таким чином для всіх досліджуваних культур коефіцієнт ефективності використання добрива значно вищий для капсульованих добрив у порівнянні із гранульованими (максимально - більше, ніж у 4 рази). За меншої кількості внесеної діючої речовини врожайність на ділянках, де внесені капсульовано добрива, значно вища. Це підтверджує високу агрономічну ефективність застосування капсульованих мінеральних добрив у агротехнологіях сільського господарства.

## ВИСНОВКИ

В результаті виконання дисертаційної роботи розв'язано актуальну науково-практичну задачу підвищення рівня екологічної безпеки рослинництва застосуванням мінеральних добрив пролонгованої дії, капсульованих модифікованим поліетилентерефталатом. Основні наукові та практичні результати роботи полягають у:

1. Проведена оцінка можливості застосування полімерних відходів для капсулювання мінеральних добрив. Встановлено, що як основа плівкотвірних композицій для створення капсульованих гранульованих мінеральних добрив різної тривалості дії можуть бути використані такі види полімерних відходів як поліетилентерефталат, поліпропілен, поліетилен, полівінілхлорид. Перевагою застосування ПЕТФ є функціонуюча система селективного збору відходів, недоліком – необхідність модифікування з ціллю забезпечення розчинності в органічних розчинниках.

2. Досліджені технологічні параметри капсулювання гранульованих мінеральних добрив модифікованим ПЕТФ в установці киплячого шару. Встановлено, що залежності гідравлічного опору шару гранульованих мінеральних добрив в умовах зрошення розчином плівкоутворювача визначаються рівняннями  $\frac{\Delta P_p}{\Delta P_c} = 1 + (2,254 - 6 \cdot 10^{-5} Re_2) \frac{w_p}{w}$  - для нітроамофоски і  $\frac{\Delta P_p}{\Delta P_c} = 1 + (2,002 - 7 \cdot 10^{-5} Re_2) \frac{w_p}{w}$  для аміачної селітри.



Проведені експериментальні дослідження тепло- та масообміну процесу капсулювання гранульованої аміачної селітри та нітроамофоски. Визначені числові значення коефіцієнтів тепловіддачі  $\alpha$  та коефіцієнтів масовіддачі  $\beta$ , які дали змогу встановити витрату плівкоутворювача для різних варіантів реалізації процесу капсулювання. На запропоновану полімерну дисперсію для капсулювання добрив отримано патент України.

3. Проведені тестові дослідження капсульованих добрив згідно методики EN 13266:20. Отримані результати свідчать про те, що кінетичні криві розчинення мають прогнозований характер, процес проходить плавно без різких спадів чи підйомів. Це слугує доказом рівномірного, якісного покриття, яке дає можливість отримувати мінеральні добрива подовженої дії із необхідним часом вивільнення.

4. В лабораторних умовах досліджено вплив капсульованих ПЕТФ мінеральних добрив на зміну рН ґрунту, мікробіоту ґрунту та кінетику росту тестових рослин. Зниження рН ґрунтових зразків із добривом в порівнянні із контрольними зразками є ознакою поступового вивільнення компонентів добрива та є позитивним фактором, оскільки слабко-кисле значення рН ґрунту є оптимальним для розвитку більшості культур. Як результат дотримання такого рівня рН підвищується доступність поживних речовин для рослин. Інтенсивне проростання рослин під впливом добрива зумовлювало активний фотосинтез та виведення органічних речовин, що є субстратами для розвитку великої кількості мікроорганізмів. Ймовірною причиною менш активного приросту кількості мікроорганізмів у зразках з рослинами, але без добрив є менш інтенсивні в цих умовах проростання та розвиток рослин, і відповідно, менш інтенсивна секреція органічних речовин продуктів фотосинтезу, що поступали у ґрунт менш активно. Дослідження кінетики росту тестових рослин підтвердили, що найефективнішими є капсульовані ПЕТФ добрива.

5. Проведений теоретичний аналіз балансових співвідношень використання різних видів мінеральних добрив в агроєкосистемах та кількість втрат незасвоєних елементів живлення від цих видів мінеральних добрив у довкілля. Встановлено, що у випадку використання капсульованих добрив замість гранульованих, забруднення довкілля залишковими, незасвоєними рослинами добривами зменшується майже в 4 рази.

6. Проведені польові агроєкологічні дослідження застосування капсульованих ПЕТФ мінеральних добрив в агроєкосистемах таких культур як картопля, соя та кукурудза. Застосування капсульованих мінеральних добрив пролонгованої дії показало значно вищу екологічну та агрономічну ефективність в порівнянні із гранульованими добривами для всіх досліджуваних культур.

7. Проведена оцінка екологічної та агрономічної ефективності використання мінеральних добрив, капсульованих ПЕТФ. Для всіх досліджуваних культур коефіцієнт ефективності використання добрива значно вищий для капсульованих добрив у порівнянні із гранульованими (максимально - більше, ніж у 4 рази). За меншої кількості внесеної діючої

речовини врожайність на ділянках, де внесені капсульовано добрива, значно вища.

8. Матеріали дисертаційної роботи передані для впровадження в Сумський державний науково-дослідний університет мінеральних добрив та пігментів.

### **Список праць за темою дисертації Статті у колективних монографіях**

1. Нагурський О.А. Застосування полімерних відходів для капсулювання мінеральних добрив/О.А. Нагурський., В.В.Ващук, М.С.Мальований, С.Д.Синельников//Розвиток і відтворення ресурсного потенціалу суб'єктів еколого-економічних, туристичних та екоінформаційних систем. – Львів: В-во Львівської політехніки, 2015. – 340 с. – С. 250-258. *Особистий внесок – проведення експериментальних досліджень.*
2. Мальований М.С. Використання капсульованих мінеральних добрив – ефективний спосіб попередження забруднення агроecosystem/М.С.Мальований, О.А.Нагурський, О.Д.Синельников, В.В.Ващук, І.С.Тимчук//Соціо-еколого-економічний розвиток агропродовольчої сфери України в сучасних умовах: проблеми та шляхи їх розв'язання: монографія – Одеса: Астропринт, 2015. С.274 - 285. *Особистий внесок – проведення експериментальних досліджень.*

### **Статті у виданнях, які входять до наукометричної бази даних Scopus**

3. Innovative creation technologies for the growth substrate based on the man-made waste – perspective way for Ukraine to ensure biological reclamation of waste dumps and quarries/I. Tymchuk, M. Malovanyu, O. Shkvirko, V. Zhuk, A. Masikevych, S.Synelnikov//International Journal of Foresight and Innovation Policy. Vol.14, №2/3/4 - 2020. - P.248-263. *Особистий внесок – аналіз можливості застосування капсульованих добрив у технологіях біологічної рекультивації.*
4. Malovanyu M.S. Utilization of sorted secondary PET waste - raw materials in the context of sustainable development of the modern city/M.S.Malovanyu, S.D.Synelnikov, O.A.Nagurskiy, K.M.Soloviy, I.S.Tymchuk//IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering, 2020, 907 (2020) 012067 IOP Publishing. P.1-5. *Особистий внесок – аналіз можливості ПЕТ- відходів у складі капсулоутворюючої композиції капсульованих мінеральних добрив.*

### **Статті у наукових фахових виданнях України**

5. Нагурський О.А. Застосування полімерних відходів для капсулювання мінеральних добрив/О.А.Нагурський, М.С.Мальований, С.Д.Синельников, В.В.Ващук//Науковий вісник НЛТУ України. Вип. 25.8. – 2015. – С. 139 - 145. *Особистий внесок – аналіз типів полімерних відходів, які можуть бути використані як капсуло утворюючий компонент.*
6. Synelnikov S. Improvement of environmental safety of agricultural systems as a result of encapsulated mineral fertilizers implementation/S.Synelnikov, K.Soloviy, M.Malovanyu, I.Tymchuk, O.Nahurskyu//Environmental problems. Vol.4, № 4. – 2019. – P. 222–228. *Особистий внесок – розрахунку балансу втрат елементів живлення із добрив різного типу в довкілля.*

7. Nagursky O. Studying the properties of granulated and fertilizer encapsulated with pet-based shell/O.Nagursky, M.Malovanyu, S.Sinelnikov, I.Tymchuk, G.Krylova//Environmental problems. Vol.5, № 1. – 2020. – P. 35-38. *Особистий внесок – аналіз відомих технологій капсулювання.*
8. Нагурський О.А. Технологічні аспекти капсулювання нітроаммофоски плівкою на основі модифікованого ПЕТФ/О.А.Нагурський, І.С.Тимчук, М.С.Мальований, С.Д. Синельніков, Г.В. Крилова//Науковий вісник НЛТУ України. Т.30, №2 – 2020. – С. 77-82. *Особистий внесок – проведення експериментальних досліджень.*
9. Synelnikov S. Theoretical and practical aspects of the efficiency of application of mineral fertilizers encapsulated with polyethylene terephthalate/S. Synelnikov, M. Malovanyu, O. Nahurskyu, L. Luchyt, K. Petrushka, I. Tymchuk, O. Stokalyuk. *Environmental problems. Vol.5, № 2. – 2020. – p. 95 - 101. Особистий внесок – аналіз результатів експериментальних досліджень.*

#### Тези доповідей

10. Нагурський О.А. Застосування полімерних відходів для капсулювання мінеральних добрив/О.А.Нагурський, С.Д.Синельніков, В.В.Ващук//V-й Всеукраїнський з'їзд екологів з міжнародною участю (Екологія/Ecology - 2015), 26-26 вересня, 2015. Збірник наукових праць. – Вінниця: ТОВ «Нілан-ЛТД» 2015. С. 181. *Особистий внесок – аналіз інформації щодо мінімізації екологічної небезпеки від відходів.*
11. Нагурський О.А. Технологічні аспекти отримання плівкотвірних композицій з відходів пет-пластику для капсулювання мінеральних добрив/О.А.Нагурський, С.Д.Синельніков//4-й міжнародний конгрес «Захист навколишнього середовища. Енергоощадність. Збалансоване природокористування.» Збірник матеріалів. – Львів, 21-23 вересня 2016 р. С. 130. *Особистий внесок – підбір оптимальних параметрів процесу.*
12. Екологічно безпечна утилізація відходів поліетилентерефталату шляхом використання їх для капсулювання мінеральних добрив/М.С.Мальований, С.Д.Синельніков, О.А.Нагурський, І.С.Тимчук, С.Б.Мараховська, В.В.Попович.//5-й Міжнародний конгрес захист навколишнього середовища. Енергоощадність. Збалансоване природокористування. Збірник матеріалів. - Львів, 26–29 вересня 2018 р. С. 147. *Особистий внесок - аналіз екологічної небезпеки від забруднення довкілля ПЕТ.*
13. Синельніков С.Д. Оцінка можливості застосування полімерних відходів для капсулювання мінеральних добрив/С.Д.Синельніков, М.С.Мальований, О.А.Нагурський, І.С.Тимчук//VII-й Всеукраїнський з'їзд екологів з міжнародною участю (Екологія / Ecology – 2019, збірник наукових праць. - Вінниця, 25–27 вересня 2019 р. С. 205. *Особистий внесок – здійснення постановочних експериментів.*
14. Мальований М.С. Екологічно безпечні капсульовані мінеральні добрива пролонгованої дії/М.С.Мальований, С.Д.Синельніков, І.С.Тимчук, Н.О.Нагурський// Проблеми екології та енергозбереження, матеріали XIII

Міжнародної науково-технічної конференції 20–22 вересня 2019 р. -Миколаїв 2019. С. 93–94. *Особистий внесок – розроблення методики досліджень.*

15. Розкриття проблеми застосування інноваційних типів капсульованих добрив пролонгованої дії в навчальному курсі агроекологія/О.І.Мороз, М.С.Мальований, С.Д.Синельников, О.А.Нагурський, І.М.Петрушка, І.С.Тимчук//Всеукраїнська науково-методична конференція «Управління якістю підготовки фахівців». Одеса ТЕС 2019 р. С. 114. *Особистий внесок – аналіз можливості застосування теоретичних положень у навчальному процесі.*

16. Застосування капсульованих мінеральних добрив – перспективний шлях підвищення екологічної безпеки агроєкосистем/О.І.Мороз, М.С.Мальований, С.Д.Синельников, І.С.Тимчук, О.А.Нагурський, І.М.Петрушка, О.П.Шквірко//Збірник наукових праць XVII міжнародної науково-технічної конференції «Проблеми екологічної безпеки» 02-04 жовтня 2019р. - Кременчук 2019р. С.125-128. *Особистий внесок – проведення експериментальних досліджень.*

17. Мальований М.С. Екологічнобезпечні капсульовані добрива пролонгованої дії/М.С.Мальований, О.А.Нагурський, І.С.Тимчук, С.Д.Синельников//Матеріали Міжнародної науково-практичної конференції «Сучасний стан і перспективи розвитку ландшафтної архітектури, садово-паркового господарства, урбоекології та фіто меліорації». м. Львів, 4-5 квітня 2019р. С.271. *Особистий внесок - дослідження щодо впливу використання добрива на стан ґрунтів сільськогосподарського призначення.*

18. Синельников С. Застосування капсульованих мінеральних добрив – шлях до підвищення рівня екологічної безпеки агротехнологій/С.Синельников, М.Мальований, О.Нагурський, І.Тимчук//Сталий розвиток – стан та перспективи: матеріали II міжнародного наукового симпозиуму, 12-15 лютого 2020 р. Львів-Славське, 2020. URL: [http://science.lpnu.ua/sites/default/files/attachments/2019/19110/importantdoc/sdev2020proceedings\\_1.pdf](http://science.lpnu.ua/sites/default/files/attachments/2019/19110/importantdoc/sdev2020proceedings_1.pdf) (дата звернення: 01.03.2020). *Особистий внесок – дослідження зміни рН та вмісту масової частки елементів живлення у ґрунтах.*

19. Синельников С.Д. Охорона навколишнього середовища в агроєкосистемах в результаті застосування капсульованих мінеральних добрив/С.Д.Синельников, М.С.Мальований, О.А.Нагурський, І.С.Тимчук, Andriy Malovanyu//Авіація, промисловість, суспільство: матеріали I міжнародної науково-практичної конференції, присвяченої 60-річчю КЛК ХНУВС, 14 травня 2020 р. Кременчук, 2020. С.323. *Особистий внесок – дослідження впливу добрива на мікробіоценоз ґрунту.*

20. Мальований М.С. Забезпечення утилізації відсортованих твердих побутових відходів – невідмінна умова сталого розвитку сучасного міста/М.С.Мальований, О.А.Нагурський, С.Д.Синельников, І.С.Тимчук//Інноваційні технології в архітектурі і дизайні: матеріали VI міжнародної науково-практичної конференції, 21 - 22 травня 2020р. Харків, 2020. С.257 – 259. *Особистий внесок – аналіз динаміки накопичення ПЕТ-відходів у містах.*

21. Синельніков С. Екологізація агропромислового комплексу внаслідок впровадження капсульованих мінеральних добрив/С.Синельніков, К.Jozwiakowska, І.Тимчук, М.Мальований, О.Нагурський//Регіональні проблеми охорони довкілля: матеріали міжнародної наукової конференції молодих вчених, 1 - 3 червня 2020р. Одеса, 2020. С.143 – 145. *Особистий внесок – аналіз агроекологічних аспектів застосування капсульованих добрив.*

#### **Статті у інших наукових виданнях**

22. Malovanyu M. Prospect of using pet waste for environmentally friendly mineral fertilizers/ М.Маловану, О.Нагурський, С.Синельніков, В.Вашчук//Environmental problems. Vol.1, № 1. – 2016. – Р. 19–22. *Особистий внесок – проведення експериментальних досліджень.*

#### **Патент**

23. Полімерна дисперсія для капсулювання добрив. Патент на корисну модель UA 142218/М.С.Мальований, С.Д.Синельніков, І.С.Тимчук, О.А.Нагурський, М.І.Канда, О.М.Шквірко. МПК C05F 3/00 (2020.01) Номер заявки u 2019 10785; дата подання заявки 31.10.2019; дата публікації відомостей про видачу патенту та номер бюлетеня 25.05.2020, бюл. № 10. *Особистий внесок – проведення експериментальних досліджень. Особистий внесок – проведення експериментальних досліджень.*

#### **АНОТАЦІЯ**

Синельніков С.Д. Екологічна безпечна утилізація відходів поліетилентерефталату використанням їх для капсулювання мінеральних добрив. - На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 21.06.01 «Екологічна безпека». – Національний університет «Львівська політехніка» Міністерство освіти і науки України, Львів, 2021.

В дисертаційному дослідженні розв’язане актуальне науково-практичне завдання: підвищення рівня екологічної безпеки рослинництва застосуванням мінеральних добрив пролонгованої дії, капсульованих модифікованим поліетилентерефталатом. Досліджені еколого-технологічні аспекти утилізації відходів ПЕТФ у виробництві капсульованих мінеральних добрив. Встановлена залежність необхідної товщини оболонки від терміну дії капсульованого амонію нітрату за різних значень коефіцієнту дифузії у матеріалі оболонки. Експериментально досліджена дифузія розчину амонію нітрату через полімерну плівку різної товщини. Досліджені окремі стадії утилізації відходів ПЕТФ у виробництві капсульованих мінеральних добрив: збір використаних виробів з ПЕТФ; первинна переробка зібраних відходів; створення плівкоутворюючої композиції; капсулювання гранульованих мінеральних добрив. Проведений аналіз технологічних рішень в процесі капсулювання мінеральних добрив оболонкою на основі модифікованого ПЕТФ. Досліджена гідродинаміка та тепломасообмін нанесення покриття на дисперсні матеріали. Дослідження теплообміну здійснювали за встановлених гідродинамічних умов процесу

капсулювання. Проведені тестові дослідження капсульованих добрив згідно методики EN 13266:20. В лабораторних умовах досліджено вплив капсульованих ПЕТФ мінеральних добрив на зміну рН ґрунту, мікробіоту ґрунту та кінетику росту тестових рослин. Проведений теоретичний аналіз балансових співвідношень використання різних видів мінеральних добрив в агроєкосистемах та кількість втрат незасвоєних елементів живлення від цих видів мінеральних добрив у докiлля. Проведені польові агроєкологічні дослідження застосування капсульованих ПЕТФ мінеральних добрив в агроєкосистемах таких культур як картопля, соя та кукурудза. Застосування капсульованих мінеральних добрив пролонгованої дії показало значно вищу екологічну та агрономічну ефективність в порівнянні із гранульованими добривами для всіх досліджуваних культур. Проведена оцінка екологічної та агрономічної ефективності використання мінеральних добрив, капсульованих ПЕТФ. Для всіх досліджуваних культур коефіцієнт ефективності використання добрива значно вищий для капсульованих добрив у порівнянні із гранульованими (максимально - більше, ніж у 4 рази). За меншої кількості внесеної діючої речовини врожайність на ділянках, де внесені капсульовані добрива, значно вища.

**Ключові слова:** екологічна безпека, капсульовані мінеральні добрива, агроєкологічні дослідження, кінетика росту тестових рослин.

### ABSTRACT

*S.D.Synelnikov.* Environmentally safe utilization of polyethylene terephthalate waste using them for encapsulation of mineral fertilizers. – On the rights of manuscript.

Dissemination for the degree of Candidate of Technical Sciences in the speciality 21.06.01 "Environmental Safety". – Lviv Polytechnics National University of the Ministry of Education and Science of Ukraine, Lviv, 2021.

In the thesis research actual scientific and practical task is solved: increasing environmental safety level of plant growing by applying the mineral fertilizers of the prolonged action encapsulated by the modified polyethylene terephthalate. Environmental and technological aspects of PET waste disposal in the production of encapsulated mineral fertilizers have been studied. The dependence of the required shell thickness on the duration of encapsulated ammonium nitrate at different values of the diffusion coefficient in the shell material is established. Diffusion of ammonium nitrate solution through a polymer film of different thickness was experimentally investigated. Separate stages of PET waste utilization in the production of encapsulated mineral fertilizers have been studied: collection of used PET products; primary collected waste processing; creation of a film-forming composition; granular mineral fertilizers encapsulation. The analysis of technological decisions in the process of mineral fertilizers encapsulation by a cover on the basis of the modified PET is carried out. The hydrodynamics and heat and mass transfer of coating on dispersed materials is investigated. Heat transfer studies were performed under the established hydrodynamic conditions of the encapsulation process. Test studies of encapsulated fertilizers have been carried out according to the method of

EN 13266: 20. Under laboratory conditions, the effect of encapsulated PET mineral fertilizers on changes in soil pH, soil microbiota and growth kinetics of test plants were studied. A theoretical analysis of the balance ratios on the use of different types of mineral fertilizers in agroecosystems and the amount of undigested nutrients loss from these mineral fertilizers types in the environment. Field agroecological studies have been conducted on the use of encapsulated PET mineral fertilizers in agroecosystems of crops such as potatoes, soybeans and corn. The use of encapsulated mineral fertilizers with prolonged action showed significantly higher environmental and agronomic efficiency compared to granular fertilizers for all studied crops. The environmental and agronomic efficiency on the use of mineral fertilizers encapsulated in PET was evaluated. For all studied crops, the efficiency of fertilizer use is much higher for encapsulated fertilizers compared to granular (maximum - more than 4 times). With a smaller amount of applied active substance, the yield in areas where fertilized fertilizers are applied is much higher.

**Key words:** environmental safety, encapsulated mineral fertilizers, agroecological researches, growth kinetics of test plants.

### АННОТАЦИЯ

Синельников С.Д. Экологически безопасная утилизация отходов полиэтилентерефталата использованием их для капсулирования минеральных удобрений. - На правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 21.06.01 «Экологическая безопасность». - Национальный университет «Львівська політехніка» Министерства образования и науки Украины, Львов, 2021.

В диссертационном исследовании решена актуальная научно-практическая задача: повышение уровня экологической безопасности растениеводства применением минеральных удобрений пролонгированного действия, капсулированных модифицированным полиэтилентерефталатом.

Исследованы эколого-технологические аспекты утилизации отходов ПЭТФ в производстве капсулированных минеральных удобрений. Преимуществом применения ПЭТФ является функционирующая система селективного сбора отходов, недостатком - необходимость модификации с целью обеспечения растворения в органических растворителях. Установлена зависимость необходимой толщины оболочки от срока действия капсулированного аммония нитрата при различных значениях коэффициента диффузии в материале оболочки. Экспериментально исследована диффузия раствора аммония нитрата через полимерную пленку разной толщины. На основании анализа результатов исследований рассчитаны значения коэффициента диффузии  $\text{NH}_4\text{NO}_3$  через полимерные пленки.

Проведен анализ технологических решений в процессе капсулирования минеральных удобрений оболочкой на основе модифицированного ПЭТФ. Исследована гидродинамика нанесения покрытия на дисперсные материалы. Экспериментально исследованы зависимости потерь напора гранулированной нитроаммофоски и аммиачной селитры от скорости псевдооживления и

интенсивности орошения. В результате анализа теоретических и экспериментальных результатов получены уравнения для расчета изменения гидравлического сопротивления слоя материала в состоянии псевдооживления в условиях орошения в зависимости от расхода жидкости и величины критерия  $Re_r$ . Полученные уравнения позволяют рассчитать изменение гидравлического сопротивления слоя гранулированной нитроаммофоски и аммиачной селитры по сравнению с сухим. Экспериментально установлено распределение температуры воздуха по высоте слоя гранулированных минеральных удобрений в процессе капсулирования при разных расходах пленкообразователя.

Проведены тестовые исследования капсулированных удобрений согласно методике EN 13266: 20. Полученные результаты свидетельствуют о том, что кинетические кривые растворения имеют прогнозируемый характер, процесс происходит плавно без резких спадов или подъемов. Это служит доказательством равномерного, качественного покрытия, которое дает возможность получать пролонгированные минеральные удобрения с необходимым временем действия.

В лабораторных условиях исследовано влияние капсулированных ПЭТФ минеральных удобрений на изменение pH почвы, микробиоту почвы и кинетику роста тестовых растений. Проведен теоретический анализ балансовых соотношений использования различных видов минеральных удобрений в агроэкосистемах и количество потерь элементов питания растений для этих видов минеральных удобрений в окружающую среду. Установлено, что при использовании капсулированных удобрений вместо гранулированных, загрязнение окружающей среды остаточными удобрениями уменьшается почти в 4 раза.

Проведены полевые агроэкологические исследования применения капсулированных ПЭТФ минеральных удобрений в агроэкосистемах таких культур как картофель, соя и кукуруза. Применение капсулированных минеральных удобрений пролонгированного действия показало значительно более высокую экологическую и агрономическую эффективность по сравнению с гранулированными удобрениями для всех исследуемых культур. Для всех исследуемых культур коэффициент эффективности использования удобрения значительно выше для капсулированных удобрений по сравнению с гранулированными (максимально - больше, чем в 4 раза). При меньшем количестве внесенного действующего вещества урожайность на участках, где внесены капсулированные удобрения, значительно выше.

**Ключевые слова:** экологическая безопасность, капсулированные минеральные удобрения, агроэкологические исследования, кинетика роста тестовых растений.