

Шифр «Пластик»

**СТУДЕНТСЬКА НАУКОВА РОБОТА**

на тему:

**Покращення якості довкілля в умовах забруднення  
відходами полістиролу**

2020 рік

## Зміст

| №   | Назва   | Стор. |
|-----|---|-------|
|     | Вступ   | 3     |
|     | РОЗДІЛ 1 Дослідження біодеструкції полістиролу у ґрунтовому середовищі  | 4     |
| 1.1 | Механізм біологічного розкладу полістиролу  | 5     |
| 1.2 | Дослідження процесу біодеструкції полістиролу   | 7     |
|     | РОЗДІЛ 2 Утилізації відходів полістиролу у виробництві капсульованих мінеральних добрив                             | 19    |
| 2.1 | Обґрунтування можливості збирання відходів полістиролу для використання їх в якості вторинних матеріальних ресурсів | 19    |
| 2.2 | Отримання плівкоутворюючої композиції та капсулювання гранульованих мінеральних добрив                              | 21    |
| 2.3 | Капсулювання гранульованих мінеральних добрив   | 26    |
|     | Висновки  | 31    |
|     | Список використаної літератури  | 32    |
|     | Анотація  | 34    |

## ВСТУП

До найактуальніших проблем сьогодення, що торкаються кожного жителя планети, й від яких залежить майбутнє людства, слід віднести проблеми екологічні. Викликані недалекоглядним, необґрунтованим ставленням людини до природи, вони виникли не сьогодні й не вчора. Із розвитком цивілізації та науково-технічного прогресу бурхливим зростанням кількості населення на Землі, обсягів виробництва та його відходів, проблема стосунків між природою та суспільством дедалі загострюються.

В 21ст. навколишнє середовище нашої планети неухильно погіршується внаслідок антропогенного впливу. Навколишнє середовище вже не спроможне адаптуватися до цих швидких і глобальних змін і може стати непридатним для існування. Вся планета сьогодні страждає від антропогенного тиску, він проявляється через пере забруднення навколишнього середовища, виснаження природних ресурсів і деградацію екосистем, деградацію ґрунтів, хижацьке винищення лісів. Крім того, постала проблема демографічного вибуху і обмеженості природних ресурсів та життєвого простору земної кулі. Внаслідок цього почалося прогресуюче руйнування біосфери Землі, що може набути характеру незворотних процесів.

## РОЗДІЛ 1

### ДОСЛІДЖЕННЯ БІОДЕСТРУКЦІЇ ПОЛІСТИРОЛУ У ГРУНТОВОМУ СЕРЕДОВИЩІ

Захоронення або вивіз на смітник мало придатні для утилізації відходів полімерних матеріалів. Це обумовлено тим, що їх об'єм не змінюється з часом. Відповідно площі, зайняті під смітники, повинні безперервно збільшуватися, це призводить до виведення з господарського обороту значних територій, довгостроковим забрудненням навколишнього середовища і не раціональним з енергетичної точки зору. Однак цей метод і сьогодні широко застосовується в Україні.

Найбільш доцільним методом знешкодження таких залишків є деструкція пластику з отриманням кінцевих, абсолютно нешкідливих для довкілля речовин – води та вуглекислого газу [1]. Для безпечного знешкодження відпрацьованих виробів розроблені полімери здатні до фото-, біо- та вододеструкції. Ефект деструкції досягається, головним чином, за рахунок введення добавок або приєднання ініціюючих груп до полімерних ланцюгів.

Фотохімічна деструкція полімерів проходить під дією ультрафіолетового випромінювання. Гранульовані мінеральні добрива вносяться, як правило, розсівом під оранку або культивуацію, а інколи при боронуванні [2]. В результаті такого застосування гранули потрапляють у верхні шари ґрунту і практично не піддаються впливу сонячного випромінювання. Модифікація полімеру для досягнення здатності до фотодеструкції є недоцільною в силу малої ефективності цього процесу.

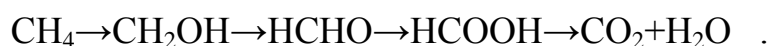
У ґрунтовому середовищі деструкція полімеру можлива лише біохімічним шляхом. З метою надання полімерам здатності до біодеструкції до них додають природні полісахариди, які представляють собою ідеальний об'єкт атаки більшості мікроорганізмів [2, 3].

Відомі факти безпосереднього застосування не модифікованих відходів пінополістиролу для покращення структури ґрунтів [4]. Це служить підтвердженням безпечного перебування певної кількості полістиролу у ґрунті у вигляді відпрацьованих функціональних оболонок повільнодіючих мінеральних добрив.

Даний розділ присвячений дослідженню процесу біологічного розкладу полістиролу під дією ґрунтових мікроорганізмів.

### 1.1. Механізм біологічного розкладу полістиролу

Полістирол представляє собою аліфатичний ланцюг із приєднаним ароматичним кільцем. Деструкцію полістиролу розглядаємо як процес окислення мікроорганізмами у внутрішньому середовищі клітини мікроорганізму за участю ферментів, які продукуються цими ж мікроорганізмами. Окислення органічних речовин до  $\text{CO}_2$  і  $\text{H}_2\text{O}$  проходить у декілька стадій за участю ферментів оксигеназ. Так, окислення аліфатичного ланцюга описується наступною схемою [5]:



Схеми окислення ароматичних сполук досить різноманітні. Розпад цих речовин супроводжується розривом кільця, який описується трьома основними схемами.

За першою схемою (рис.1.1) розрив ароматичного кільця відбувається між двома гідроксильованими атомами вуглецю, з утворенням таких проміжних продуктів, як пірокатехін, цис-муконова кислота,  $\beta$ -кетoadипінова кислота, ацетилхоліл, цикл трикарбонових кислот (цикл Кребса або лимонної кислоти) [5]:



Рисунок 1.1 - Схема розпаду ароматичного кільця за розривом між двома гідроксильованими атомами вуглецю

Другий шлях розриву ароматичного кільця - це розрив між гідроксильованим і негідроксильованим атомом вуглецю (рис.1.2.). У цьому випадку пірокатехін під дією ферменту розпадається на напівальдегід 2-оксі-муконової кислоти, який перетворюється в оцтову, щавелево-оцтову, мурашину кислоту або оцтовий альдегід:



Рисунок 1.2 - Схема розпаду ароматичного кільця за розривом між гідроксильованим і негідроксильованим атомами вуглецю

Третій шлях характеризується розривом ароматичного кільця між гідроксильованим атомом вуглецю і атомом вуглецю, який з'єднаний з карбоксильною або іншою кисневмісною групою (рис.1.3.):

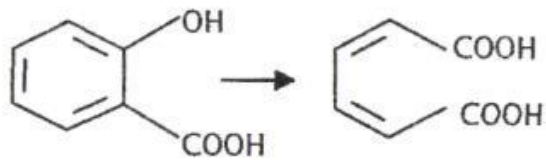


Рисунок 1.3 - Схема розпаду ароматичного кільця за розривом між гідроксильованим атомом вуглецю і атомом вуглецю, який з'єднаний з карбоксильною або іншою кисневмісною групою

Представлені вище схеми метаболізму забруднювачів є спрощеними. У реальних умовах проходять складні біохімічні перетворення, проте розуміння викладеного дозволяє зробити висновок про можливість безпечного для довкілля застосування відходів полістиролу в якості основи плівкоутворюючої композиції для капсулювання гранульованих легкокорозчинних мінеральних добрив.

## 1.2. Дослідження процесу біодеструкції полістиролу

Оболонка на поверхні гранули мінерального добрива повинна забезпечувати необхідну інтенсивність вивільнення активних компонентів під час усього вегетативного періоду. Занадто швидкий процес біодеструкції може призвести до дострокового руйнування капсули що є небажаним у випадку повільнодіючих добрив. Занадто повільний процес розкладу полімеру веде за собою його накопичення у ґрунті. З цією метою необхідним є оцінка кінетики процесу біодеструкції для забезпечення прогнозованих властивостей капсульованим мінеральним добривам.

Процес біодеструкції здійснюється мікроорганізмами життєва активність яких залежить від багатьох, часто випадкових факторів навколишнього середовища [6].

В тих випадках, коли інформації про досліджуваний процес недостатньо, або процес дуже складний, що не дає змоги скласти його детерміновану модель,

використовуються експериментально-статичні методи. Процес у такому випадку розглядають як «чорну скриню».

Основою для складання статистичної моделі є статистичний матеріал, який збирається відповідним чином під час реалізації процесу на фізичній моделі. Статистичну інформацію збирають за допомогою активного експерименту, який реалізується на основі відповідних планів проведення досліджень за одночасної зміни всіх основних параметрів, які визначають хід технологічного процесу. Метод активного експерименту має певні переваги перед традиційним пасивним експериментом, оскільки дає змогу суттєво зменшити кількість дослідів. Разом з тим значно спрощується математична обробка статистичної інформації і складені математичні моделі є більш якісні [7].

Полімерні матеріали у тому числі і полістирол важко піддаються біологічному розкладу. Під час створення матеріалів, здатних до біодеструкції, до їх складу додають полісахариди. Тому цей параметр є одним із впливових факторів здійснення процесу біодеструкції. Важливими факторами є температура і вологість ґрунтового середовища, які безпосередньо впливають на життєдіяльність організмів-деструкторів. Вміст організмів-деструкторів залежить від типу ґрунту, кількість яких вважаємо постійною в активний період вегетації рослин, під час якої йде основне споживання елементів мінерального живлення. В роботі проводили дослідження ступеню розкладу полістиролу в залежності від вмісту природного полісахариду в полімері та вологості ґрунту. Кількість вибраних факторів дорівнює двом, отже кількість експериментів буде дорівнювати  $N = 2^n = 2^2 = 4$  [8].

Першим етапом планування експериментальних досліджень є визначення меж зміни факторів. Згідно літературних джерел у процесі виробництва біодеструктуючих полімерів до них додають від 10 до 40 % крохмалю [2]. Приймаємо мінімальне значення 10% і максимальне 40%. Зміну вологості ґрунтового середовища приймаємо в межах 10÷20% [9]. Середня температура ґрунтів Західного регіону коливається в межах від  $-6^{\circ}\text{C}$  зимою до  $+19^{\circ}\text{C}$  влітку [9]. Найактивніше процес біодеструкції проходить звичайно в теплий період



року. Так як важливим є збереження функціональних властивостей саме в теплий період вегетації рослин, то дослідження процесу біодеструкції проводимо за умов постійної температури  $\approx 18$  °С. Полімерна оболонка на поверхні гранули мінерального добрива повинна забезпечувати контрольоване вивільнення на протязі періоду активної вегетації рослин.

Далі переводимо розмірні значення факторів у нормалізований безрозмірний вигляд за допомогою формули:

$$X_{ij} = \frac{x_{ij} - x_j^*}{\Delta x_j} \quad (1.1)$$

де  $X_{ji}$  – нормалізоване значення  $j$ -го фактору;

$x_{ji}$  – натуральне значення  $j$ -го фактора;

$x_j^*$  - середнє арифметичне діапазону зміни  $j$ -го фактора;

$\Delta x_j$  – крок зміни  $j$ -го фактора.

Результати розрахунку за формулою (1.1) приведені в табл.1.1.

Таблиця 1.1.

Кодування факторів

| Інтервал варіювання й рівень факторів | Вміст полісахариду, $G$ , % мас. | Вологість середовища $W$ , % мас. |
|---------------------------------------|----------------------------------|-----------------------------------|
| Нульовий рівень $x_i = 0$             | 25                               | 15                                |
| Інтервал варіювання $\delta_i$        | 15                               | 5                                 |
| Нижній рівень $x_i = -1$              | 10                               | 10                                |
| Верхній рівень $x_i = +1$             | 40                               | 20                                |
| Кодове позначення                     | $x_1$                            | $x_2$                             |

Далі будуємо факторний простір в натуральних (рис.1.4) та нормалізованих величинах (рис.1.5).

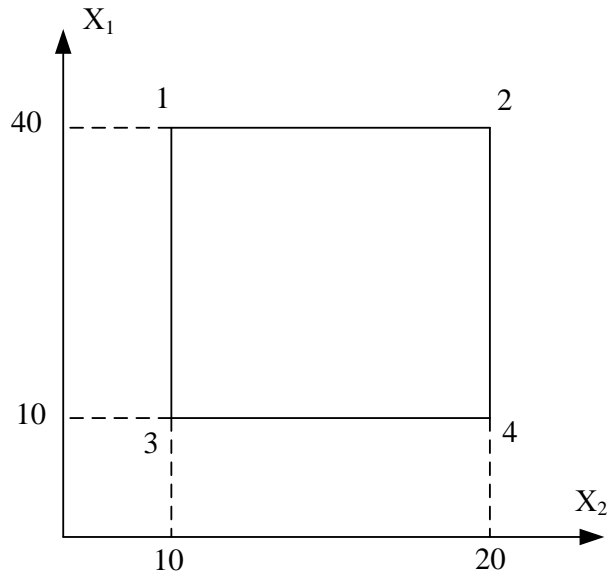


Рисунок 1.4 - Факторний простір в натуральних величинах

Точками 1, 2, 3, 4 позначені вершини факторного простору, координати яких відповідають умовам проведення експериментальних досліджень.

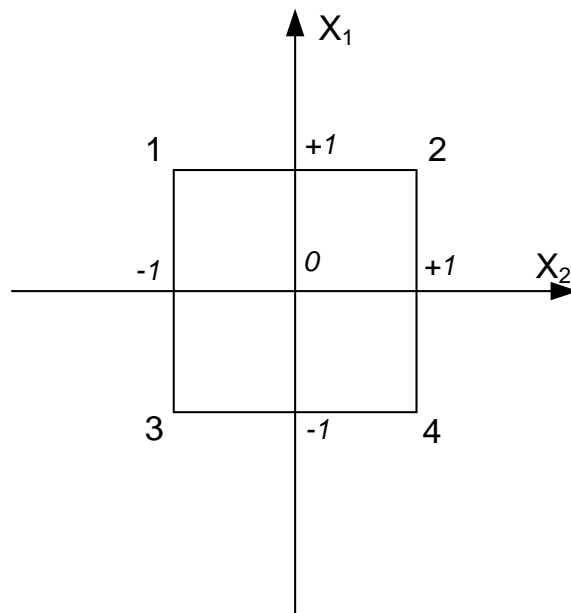


Рисунок 1.5 - Факторний простір в нормалізованих значеннях

Згідно рис.1.5 координати вершин факторного простору мають такі значення: 1(+1;-1), 2(+1;+1), 3(-1;-1), 4(-1;+1). На основі отриманих результатів будемо матрицю планування експериментів (табл.1.2.). Символом  $X_0$

позначено допоміжну величину, що дорівнює +1. Добуток факторів  $X_1$  і  $X_2$  вводимо для підвищення точності отриманої статистичної моделі.

Таблиця 1.2.

Матриця планування експериментів

| № | $X_0$ | $X_1$ | $X_2$ | $X_1 \times X_2$ |
|---|-------|-------|-------|------------------|
| 1 | 1     | +1    | -1    | -1               |
| 2 | 1     | +1    | +1    | +1               |
| 3 | 1     | -1    | -1    | +1               |
| 4 | 1     | -1    | +1    | -1               |

Для опису процесу біодеструкції полістиролу, використовуємо математичну модель у вигляді рівняння [78]:

$$y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_{12}x_1x_2, \quad (1.2)$$

де  $k$  – число регульованих факторів;

$y$  – функція відгуку;

$x_i, x_j$  – регульовані фактори;

$b_0, b_i, b_{ij}$  – коефіцієнти регресії.

Важливим етапом проведення експериментальних досліджень процесу деструкції є створення відповідних умов, які відповідали б побудованим планам. Необхідну кількість крохмалю в суміші з полістиролом визначали ваговим методом. Для отримання 10%-ї суміші зважували 90г полістиролу і 10г крохмалю. Попередньо подрібнений (розміром  $\approx 2$  мм) полістирол перемішували з крохмалем. Потім до отриманої суміші поступового невеликими частинами додавали толуол, до отримання однорідної маси. Далі розчин поміщали в сушильну шафу до повного випаровування розчинника, яку визначали за стабілізацією маси взірця.

Після видалення толуолу отриману речовину розділяли на рівні частини масою 5 г. Аналогічним чином, з відповідними пропорціями компонентів, готували взірці з вмістом крохмалю 20 % (паралельні досліди в центрі плану) і 30 %.

Дослідні взірці поміщали в ґрунт таким чином, щоб вони повністю були ним покриті. Для проведення досліджень використовували торф'яно-підзолисті ґрунти, які займають біля 75 % території Полісся [9].

Спостерігали за процесом протягом 75 днів. З метою отримання достовірних результатів одночасно проводили три паралельних досліди. Дослідження проводили за незмінної температури (18°C). Функцією відклику представляли степінь біодеструкції (відсоток зменшення молекулярної маси полімерного ланцюга). Результати експериментів представлені в табл.1.3.

Таблиця 1.3.

Результати експериментів

| № | X <sub>0</sub> | X <sub>1</sub> | X <sub>2</sub> | X <sub>1</sub> ×X <sub>2</sub> | Y    |
|---|----------------|----------------|----------------|--------------------------------|------|
| 1 | 1              | +1             | -1             | -1                             | 13,9 |
| 2 | 1              | +1             | +1             | +1                             | 21,4 |
| 3 | 1              | -1             | -1             | +1                             | 5,1  |
| 4 | 1              | -1             | +1             | -1                             | 9,5  |

Розрахувати коефіцієнти в рівнянні регресії можна на основі отриманих експериментальних даних за допомогою наступного рівняння [8]:

$$b_j = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^n x_{ij} y_i \quad (1.3)$$

де  $N$  – кількість дослідів.

Результати розрахунків за рівнянням (3.3) приведені в таблиці 3.4.

Таблиця 1.4.

Значення коефіцієнтів рівняння регресії

| $b_0$ | $b_1$ | $b_2$ | $b_{12}$ |
|-------|-------|-------|----------|
| 12,5  | 5,2   | 3,0   | 0,8      |

Значимість отриманих коефіцієнтів визначаються за допомогою критерія Стьюдента:

$$t_p = \frac{|b_j|}{Sb_j} = \frac{|b_j|}{\sqrt{D_y/N}} \quad (1.4)$$

де  $D_y$  – дисперсія відтворюваності дослідів – характеристика точності дослідів:

$$D_y = \frac{1}{N_o - 1} \sum_{i=1}^{N_o} (y_i^o - \overline{y^o})^2 \quad (1.5)$$

де  $y_i^o, \overline{y^o}$  - значення відгуку, відповідно, в  $i$ -му паралельному досліді та їх середнє значення, яке визначається за формулою:

$$\overline{y^o} = \frac{1}{N_o} \sum_{i=1}^{N_o} y_i \quad (1.6)$$

З метою визначення значимості коефіцієнтів в рівнянні регресії (1.2) проводили серію з 5-ти паралельних дослідів в центрі плану при незмінних величинах відповідних факторів. Отримані результати дослідів та розрахунки за рівняннями (1.5) і (1.6) приведені в табл. 1.5.

Результати паралельних дослідів за умовами центру плану

| № дослідів | $X_1$ | $X_2$ | $y_i^o$ | $\overline{y^o}$ | $D_y$ |
|------------|-------|-------|---------|------------------|-------|
| 1          | 25    | 15    | 10,7    | 10,3             | 0,685 |
| 2          |       |       | 9,2     |                  |       |
| 3          |       |       | 11,4    |                  |       |
| 4          |       |       | 9,9     |                  |       |
| 5          |       |       | 10,3    |                  |       |

Тоді розрахункове значення критерію Стюдента буде дорівнювати:

|       |      |      |     |     |
|-------|------|------|-----|-----|
| $b_i$ | 0    | 1    | 2   | 12  |
| $t_p$ | 30,1 | 12,5 | 7,2 | 1,9 |

Розрахункове значення критерію Стюдента порівнюється із теоретичним значенням  $t_T$ , яке вибирається в залежності від степені свободи  $f_y = \text{No}-1$  і рівня значимості, який задається самим дослідником. Для  $f_y = 4$  і вибраного рівня значимості 0,9 теоретичне значення критерію Стюдента дорівнює  $t_T = 2,35$ . Якщо  $t_p > t_T$ , то коефіцієнт регресії значимий, а також значимий відповідний фактор. В протилежному випадку, коли  $t_p < t_T$ , коефіцієнт регресії не значимий, і є неістотним відповідний фактор. В такому випадку він виключається з рівняння регресії.

Згідно проведених розрахунків значимими коефіцієнтами в рівнянні регресії (1.2) є  $b_0$ ,  $b_1$  і  $b_2$ . Коефіцієнт  $b_{12}$  є не значимий, отже фактор подвійної взаємодії  $x_{12}$  виключається з рівняння регресії. Тоді рівняння (1.2) запишемо в такому виді:

$$y = 12,5 + 5,2x_1 + 3,0x_2 \quad (1.7)$$

Отримане рівняння необхідно перевірити на адекватність, щоб визначити можливість застосування його для теоретичного розрахунку процесу

біодеструкції полістиролу в присутності картопляного крохмалю. З цією метою можна скористатись критерієм Фішера:

$$F_p = \frac{D_a}{D_y} \quad (1.8)$$

де  $D_a$  – дисперсія адекватності - характеристика розсіювання експериментальних значень відгуку відносно розрахованих за рівнянням регресії:

$$D_a = \frac{1}{N-l} \sum_{i=1}^N (y_{pi} - y_{ei})^2 \quad (1.9)$$

де  $l$  – кількість значимих коефіцієнтів в рівнянні регресії;

$y_{pi}$  – розрахункове значення відгуку, визначене за рівнянням регресії;

$y_{ei}$  – значення відгуку, визначене експериментальним шляхом.

З метою визначення дисперсії адекватності за допомогою рівняння (1.7) розраховуємо значення відгуку функції за умов спланованих значень факторів. Результати розрахунків приведено в табл. 1.6.

Таблиця 1.6

Результати теоретичних розрахунків степені біодеструкції

| № | $X_1$ | $X_2$ | $Y_{ei}$ | $Y_{pi}$ |
|---|-------|-------|----------|----------|
| 1 | +1    | -1    | 13,9     | 14,7     |
| 2 | +1    | +1    | 21,4     | 20,7     |
| 3 | -1    | -1    | 5,1      | 4,3      |
| 4 | -1    | +1    | 9,5      | 10,3     |

Тоді значення дисперсії адекватності, розраховане за рівнянням (1.9) буде дорівнювати  $D_a = 1,205$ . Звідси розрахункове значення  $F_p = 1,759$ . З таблиць розподілу Фішера визначаємо теоретичне значення  $F_T(p, f_a, f_y)$ , яке залежить від:  $p$  – рівень значимості, задається дослідником,  $f_a$  – число ступенів свободи дисперсії адекватності -  $f_a = N - l$ ,  $f_y$  – число ступенів свободи дисперсії відтворюваності  $f_y = N_o - 1$ . Таким чином отримуємо  $F_T = 3$ . В даному випадку  $F_p <$

$F_T (1,759 < 3)$ . Виходячи з цього можна зробити висновок, що отримане рівняння регресії адекватно описує результати експериментів.

Для практичного використання рівняння регресії, побудованого за планами повного факторного експерименту, отримані коефіцієнти необхідно перевести значимі коефіцієнти рівняння регресії у натуральний розмірний вигляд за допомогою наступних залежностей:

$$a_o = b_o - \sum_1^n b_j \frac{x_j^*}{\Delta x_j} \quad (1.10)$$

$$a_j = \frac{b_j}{\Delta x_j} \quad (1.11)$$

Результати розрахунків приведені у таблиці 1.7.

Таблиця 1.7

Значення коефіцієнтів рівняння регресії у натуральному вигляді

| $a_o$ | $a_1$ | $a_2$ |
|-------|-------|-------|
| -3,5  | 0,34  | 0,6   |

Підставивши коефіцієнти в рівняння регресії отримаємо статистичну математичну модель, за допомогою якої можна розрахувати степінь біодеструкції полістиролу в залежності від вмісту крохмалю  $G$  та вологості ґрунту  $W$ :

$$y = 0,34G + 0,6W - 3,5 \quad (1.12)$$

Дане рівняння представляє статистичну математичну модель, за допомогою якої можна оцінити степінь біодеструкції полістиролу в залежності від вмісту крохмалю та вологості ґрунту на протязі 75 днів. Вона може бути використана для теоретичного розрахунку процесу біодеструкції суміші полістиролу із природнім полісахаридом з метою визначення необхідних



параметрів полімерного покриття для створення мінеральних добрив, що відповідають поставленим до них вимогам.

Дослідження, які реалізовували за планом повного факторного експерименту, проводили таким чином, що б можна було відслідковувати кінетику біодеструкції. Для цього в початковий момент заклали 15 ідентичних зрізів полістиролу. Через кожні 15 днів визначали молекулярну масу 3-х зрізів. Розраховували середню величину деструкції за певний період часу. Отримані результати в графічному виді представлені на рис.1.6.

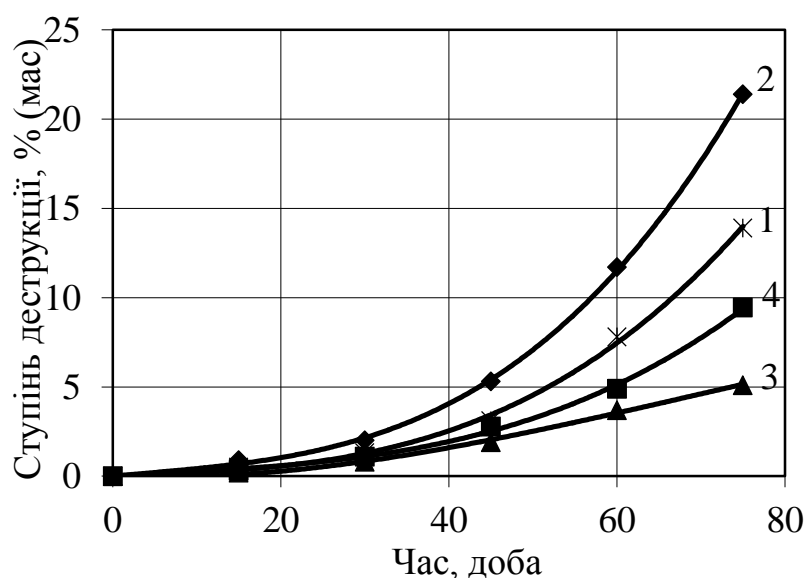


Рисунок 1.6 - Кінетика біодеструкції суміші полістиролу і природного полісахариду у ґрунтовому середовищі за умов спланованих експериментів (номер кривої відповідає номеру експерименту)

Аналіз отриманих залежностей показує, що найвищий ступінь деструкції спостерігається за максимального вмісту полісахариду та вологи (експеримент №2) і найменший – в умовах мінімальних значень цих факторів (експеримент №3). Така закономірність узгоджується із діяльністю організмів-деструкторів [6]. Процес біодеструкції полістиролу в ґрунті в природних умовах буде проходити протягом всього періоду активної життєдіяльності живих організмів, яка припадає на теплу пору року. Провівши комп'ютерну оптимізацію

експериментальних даних, отримали приблизну оцінку ступені деструкції за пів року (рис.1.7).

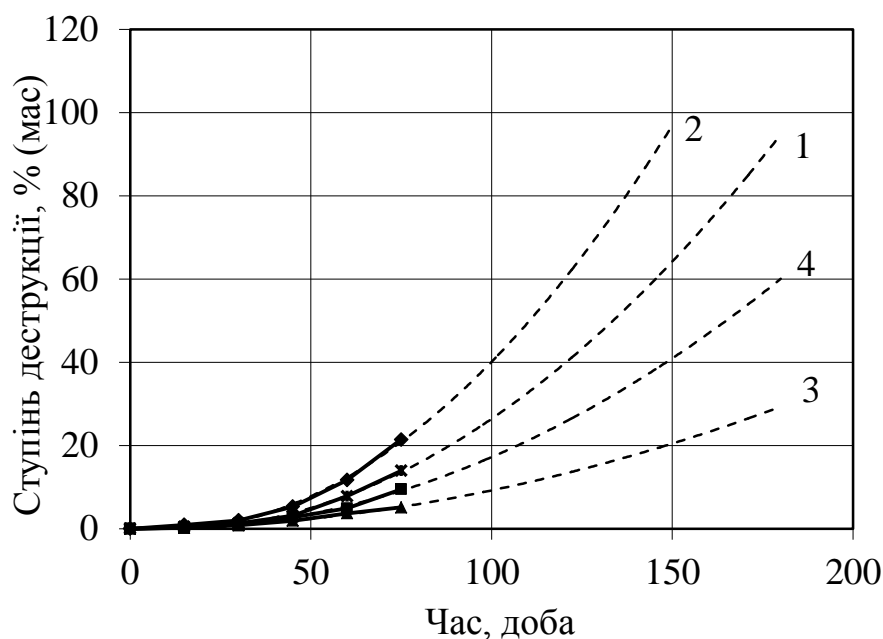


Рисунок 1.7 - Оціночні результати ступеня біодеструкції полістиролу на період до 6-ти місяців за умов спланованих експериментів (номер кривої відповідає номеру експерименту)

За результатами проведеного аналізу можна зробити висновок про можливість повної деструкції полістиролу в ґрунтовому середовищі до моменту наступного внесення капсульованих добрив. Отримані теоретичним шляхом дані будуть відрізнятися від реальних в силу багатьох факторів, що впливають на життєдіяльність ґрунтових організмів і які практично неможливо змодельовати у лабораторних умовах. Більш повну картину поведінки капсульованих добрив у ґрунті можна отримати лише в процесі проведення агрохімічних досліджень. Отримані результати підтверджують можливість виготовлення капсульованих полістиролом гранульованих синтетичних мінеральних добрив із прогнозованою деструкцією функціональної оболонки.

## **РОЗДІЛ 2**

### **УТИЛІЗАЦІЯ ВІДХОДІВ ПОЛІСТИРОЛУ У ВИРОБНИЦТВІ КАПСУЛЬОВАНИХ МІНЕРАЛЬНИХ ДОБРІВ**

Схему застосування полімерних відходів для виробництва капсульованих мінеральних добрив можна умовно поділити на три етапи:

- 1) підготовка сировини;
- 2) приготування плівкоутворюючого розчину;
- 3) капсулювання добрив.

Так як планується використовувати відпрацьований пластик, який входить до складу твердих побутових відходів, то на етапі підготовки сировини необхідно є передбачення можливості збору та сортування відходів. Вирішення цієї задачі робить доцільним метод утилізації відходів полістиролу, якому присвячена дана робота.

#### **2.1. Обґрунтування можливості збирання відходів полістиролу для використання їх в якості вторинних матеріальних ресурсів**

На сьогоднішній день економія природних ресурсів, пошуки альтернативних джерел енергії та сировини для виробництва, є досить актуальними.

На законодавчому рівні правила поводження з відходами і введення роздільного збору побутових відходів закріплені у Законі України "Про внесення змін до деяких законодавчих актів України у сфері поводження з відходами", прийнятому Верховною радою 21 січня 2010 року [10].

З метою запровадження роздільного збирання побутових відходів на виконання вимог ст. 35-1 Закону України "Про відходи" наказом Міністерства регіонального розвитку, будівництва та житлово-комунального господарства України від 01.08.2011 №133 затверджено "Методику роздільного збирання

побутових відходів", яка зареєстрована в Мін'юсті 10.10.2011 р. за №1157/19895 [11].

Методикою визначено, що роздільне збирання побутових відходів – збирання побутових відходів за окремими компонентами, включаючи сортування побутових відходів, з метою подальшого перероблення та утилізації.

Технологічні схеми роздільного збирання побутових відходів визначаються органами місцевого самоврядування.

Роздільне збирання твердих побутових відходів (далі – ТПВ) здійснюється за наступними компонентами, що входять до їх складу:

- органічною складовою побутових відходів, що легко загниває;
- папером та картоном;
- полімерами;
- склом;
- побутовим металобрухтом;
- текстилем;
- деревом;
- небезпечними відходами у складі побутових відходів;
- шкірою, гумою.

Таким чином, на рівні законодавчої влади в державі усвідомлено, що для поліпшення екологічної ситуації у сфері поводження з побутовими відходами, необхідне створення та запровадження на регіональному рівні роздільного збирання побутових відходів.

Роздільна або селективна система збирання ТПВ сприяє зменшенню кількості відходів, які вивозяться на полігони та сміттєзвалища, а також забезпечує одержання від населення відносно чистої вторинної сировини. Запровадження даної системи виправдовує себе не тільки з екологічної, але й з економічної точок зору. Так, зменшується кількість земель, відведених під полігони та сміттєзвалища, збільшується строк їх експлуатації; при переробці вторинної сировини відбувається економія природних ресурсів.

Хоча запровадження такої системи потребує по-перше, купівлі спеціальних контейнерів та спецтранспорту для вивезення кожного окремого виду вторинної сировини, збільшення кількості працюючих, пов'язаних зі збиранням відходів; по-друге, свідомого ставлення населення до роздільного збору. Але через певний час ці додаткові витрати компенсуються за рахунок утилізації вторинних ресурсів.

Як зазначалось, відходи утворюються і внаслідок виробничої діяльності. Враховуючи, що безвідходних технологій не існує, а можливий лише замкнений цикл, в процесі якого, один вид відходів стає сировиною для іншого виробничого процесу, питання роздільного збирання та утилізації (повторного використання) стосується також і промислових відходів.

Слід відмітити, що забезпечити запровадження системи роздільного збирання відходів тільки за рахунок прийнятих нормативно-правових актів неможливо.

Для зменшення трудоемності даної стадії найбільш доцільним є створення умов у сфері застосування даного пластику для його селективного збирання. З цією метою можна встановлювати спеціальні контейнери для окремого збирання полістирольної пластикової упаковки, одноразового посуду пінопласту (за прикладом селективного збирання ПЕТФ-пляшок, скла, паперу). Реалізація такого підходу дала б змогу звести до мінімуму втрати цінного матеріалу та суттєво зменшити затрати на початковій стадії переробки відходів.

Інший компонент плівкоутворюючої композиції – гідролізний лігнін є промисловим відходом целюлозо-паперового виробництва. Застосування його у виробництві капсульованих мінеральних добрив передбачає лише транспортування до місця переробки.

## **2.2. Отримання плівкоутворюючої композиції**

Нанесення покриття на частинки дисперсного матеріалу в апараті псевдозрідженого стану здійснюється шляхом розпилення плівкоутворювача в

шар частинок за допомогою форсунки. Тому необхідним є отримання плівкоутворюючої композиції в рідкому агрегатному стані. Цю задачу можна вирішити двома шляхами:

- 1) розчиненням необхідних компонентів з використанням розчинників;
- 2) змішування компонентів композиції у розплаві полістиролу.

Як вже було сказано раніше, полістирол не розчиняється у воді, тому в роботі були використані органічні розчинники. Полістирол розчиняється в ароматичних й хлорованих аліфатичних вуглеводнях, таких як: толуол, ацетон, бензол, дихлоретан, етилацетат, вуглець чотирьохлористий.

Для вибору найбільш прийняттого розчинника серед вказаних вище в таблиці 2.1 наведена коротка характеристика властивостей кожного з них.

Таблиця 2.1

Характеристика властивостей розчинників

| Розчинник                | Токсичність   | Горючість   | Вибухонебезпечність    | $T_{\text{кип}}$ ,<br>°C |
|--------------------------|---------------|-------------|------------------------|--------------------------|
| Толуол                   | Токсичний     | Горючий     | Вибухонебезпечний      | 110,6                    |
| Ацетон                   | Малотоксичний | Горючий     | Вибухонебезпечний      | 56,2                     |
| Бензол                   | Токсичний     | Горючий     | Вибухонебезпечний      | 80,1                     |
| Дихлоретан               | Токсичний     | Малогорючий | Вибухонебезпечний      | 83,48                    |
| Етилацетат               | Малотоксичний | Горючий     | Вибухонебезпечний      | 77                       |
| Вуглець чотирьохлористий | Малотоксичний | Негорючий   | Не є Вибухонебезпечним | 76,8                     |

Толуол та бензол є досить хорошими розчинниками, але відносяться до ароматичних сполук, в їх складі є бензольне кільце, що робить їх застосування найбільш небезпечним для обслуговуючого персоналу і вимагає високої герметичності обладнання та заходів пожежної безпеки. Серед представлених

розчинників найменш токсичними являються етилацетат та вуглець чотирихлористий. Для дослідження будемо використовувати вуглець чотирихлористий, оскільки етилацетат розпадається при нагріванні, перетворюючись на етиловий спирт і оцтову кислоту, а також є вогнебезпечним. Вуглець чотирихлористий є найменш токсичним, негорючим і незаймистим розчинником.

Для визначення розчинності полістиролу у вуглеці чотирихлористому проводили експериментальні дослідження. З цією метою в конічну колбу заливали 100 мл розчинника і засипали по 1 г подрібненого до розмірів 1×1 см полістиролу при постійному перемішуванні і при температурі середовища 18°C. Насичення розчину відбулося при концентрації 18 г полімеру на 100мл розчинника.

Основними критеріями, якими необхідно керуватися у процесі розроблення технології для створення капсульованих добрив є екологічна безпека виробничого процесу та застосування їх в сільському господарстві [12]. Величезне значення має вибір матеріалу для покриття частинок добрива, яке не повинне забруднювати навколишнє середовище [12]. Для цього використовують полімери, здатні деградувати під впливом навколишнього середовища [13].

Розроблена полімерна композиція для покриття мінеральних добрив, в якій використання нових компонентів – розчинника та ініціатора біодеструкції забезпечило:

- отримання однорідного розчину, здатного легко диспергуватися розпилюючими пристроями в процесі нанесення покриття на поверхню частинок для отримання якісної рівномірної оболонки;
- зменшення вибухонебезпечності полімерної дисперсії;
- утилізацію відходів целюлозно-паперового виробництва – гідролізного лігніну та уникнення при цьому забруднення навколишнього середовища;
- отримання дешевих капсульованих добрив;

- прогнозований розклад оболонки добрива протягом вегетаційного періоду.

Поставлена мета досягнута тим, що у полімерній дисперсії для капсулювання добрив як розчинник використовується вуглець чотирихлористий, а як полімер, здатний до біодеструкції – вторинний полістирол у виді відходів одноразового посуду та пакувальної тари, як ініціатор біодеструкції – гідролізний лігнін у вигляді відходів целюлозно-паперового виробництва, при наступному співвідношенні компонентів, мас. %:

вуглець чотирихлористий: 90,7-96,0;

вторинний полістирол: 3,1-7,6;

гідролізний лігнін: 0,9-1,7.

Це дало змогу отримати однорідний розчин, здатний легко диспергуватися розпилюючими пристроями в процесі нанесення покриття на поверхню частинок для отримання якісної рівномірної оболонки, зменшити вибухонебезпечність полімерної дисперсії, утилізувати відходи целюлозно-паперового виробництва, тим самим знизити вартість капсульованих добрив за рахунок використання відходів виробництва та забезпечити прогнозований розклад оболонки добрива протягом вегетаційного періоду, що дасть можливість ефективно їх застосовувати без забруднення навколишнього середовища [14].

Плівкоутворюючу композицію одержували простим змішуванням компонентів, вказаних в таблиці 2.2.

Ступінь біодеструкції оболонки добрив протягом перших трьох місяців складає 15-22%, що забезпечує вивільнення не менше 75% компонентів добрива за цей період. Через шість місяців, тобто після закінчення вегетаційного періоду, ступінь біодеструкції становить приблизно 50%, а протягом року не менше 80%. Отже, застосування даної полімерної дисперсії не створює загрози для довкілля.



Склад полімерної дисперсії для капсулювання добрив

| Компоненти, мас. %     | Приклад         |                 |        |               |
|------------------------|-----------------|-----------------|--------|---------------|
|                        | 1               | 2               | 3      | 4             |
|                        | аміачна селітра | калійна селітра | амофос | нітроамофоска |
| Вуглець чотирхлористий | 90,7            | 92,4            | 94,2   | 96            |
| Вторинний полістирол   | 7,6             | 6,2             | 4,6    | 3,1           |
| Гідролізний лігнін     | 1,7             | 1,4             | 1,2    | 0,9           |

Подальша переробка зібраної вторинної сировини здійснюється безпосередньо на місці виробництва капсульованих добрив. Після доставки необхідно передбачити миття зібраних пластикових відходів для видалення органічних речовин (залишків їжі та напоїв) та паперу. Після миття відходи подаються на сушіння, так як вуглець чотири хлористий практично не змішується з водою. Останньою стадією підготовки сировини є подрібнення пластику.

Гідролізний лігнін, що використовується як ініціатор біодеструкції полімеру, утворюється на виробництві у виді висококонцентрованої пастоподібної маси не потребує додаткової підготовки перед приготуванням плівкоутворюючої композиції.

Приготування плівкоутворюючої композиції полягає у розчиненні компонентів у чотири хлористому вуглеці. Для цього попередньо змішуються у визначених кількостях подрібнені відходи полістиролу із гідролізним лігніном. Після цього суміш подається в ємність із розчинником. Апарат для розчинення повинен бути обладнаний перемішувачем. Розчинення відбувається за кімнатної температури, тривалість якого за умов постійного перемішування складає приблизно 20 хв. У випадку наявності нерозчинених залишків (паперових етикеток, тощо) для запобігання порушень у роботі розпилюючого пристрою, необхідно пропустити розчин через ситовий фільтр.

### 2.3. Капсулювання гранульованих мінеральних добрив

Капсулювання мінеральних добрив доцільно проводити в апараті псевдозрідженого стану неперервної дії у випадку великотоннажного виробництва і в апараті періодичної дії - порівняно невеликі партії [15, 16].

Технологічна схема установки для капсулювання гранульованих синтетичних мінеральних добрив із застосуванням апарату неперервної дії приведена на рис.2.1.

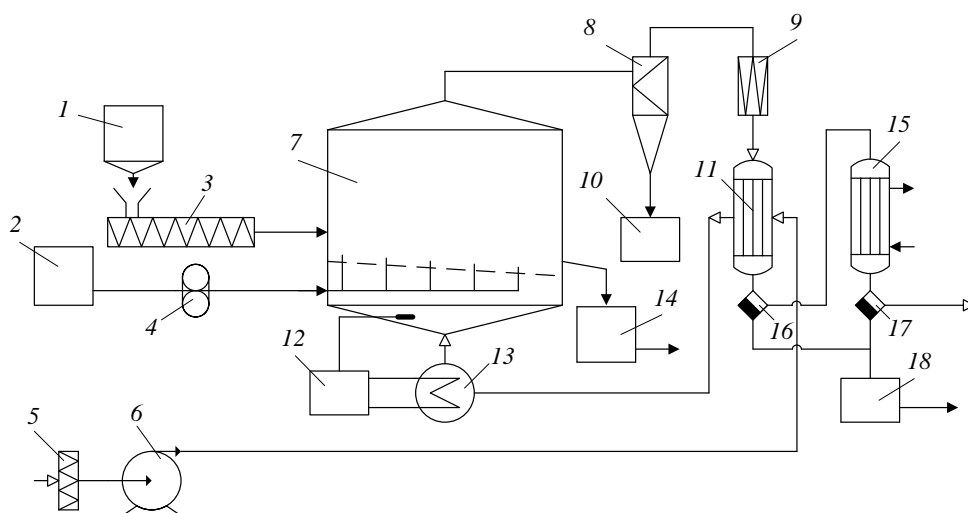


Рисунок 2.1 - Технологічна схема капсулювання гранульованих мінеральних добрив в апараті псевдозрідженого стану неперервної дії:

1-бункер вихідного добрива; 2-ємність із плівкоутворюючим розчином; 3-шнековий дозатор; 4-насос-дозатор для подачі плівкоутворювача; 5-фільтр; 6-газодувка; 7-апарат ПШ; 8-циклон; 9-рукавний фільтр; 10-бункер вловлених пилоподібних часток; 11-теплообмінник-рекуператор; 12-блок електронного регулювання температури; 13-електрокалорифер; 14-бункер капсульованих добрив; 15-конденсатор; 16, 17- конденсатовідводчик; 18-ємність регенованого розчинника

Гранульоване мінеральне добриво із бункера 1 за допомогою шнекового живильника 3 неперервно подається в апарат псевдозрідженого стану 7. Із ємності 2 за допомогою насосу-дозатора 4 подається розчин плівкоутворювача. Псевдозріджуюче повітря подається в апарат за допомогою відцентрової газодувки 6. На вході в газодувку стоїть матерчатий фільтр 5, який очищає повітря від пилоподібних часток. Повітря газодувкою подається на першу ступінь нагрівання в рекуперативний теплообмінник 11, де гарячим теплоносієм використовується відпрацьоване повітря із апарату псевдозрідженого стану. Далі повітря проходить другу ступінь нагрівання у електричному калорифері, де досягає робочої температури. Роботою електрокалорифера керує блок електронного регулювання температури, чутливий датчик якого розташовується у вхідному патрубку апарату. Відпрацьована пароповітряна суміш очищається від уламків мінерального добрива в циклонному апараті 8 та пилових часток – рукавному фільтрі 9 і поступає регенерацію розчинника. Регенерація розчинника здійснюється в два етапи. На першому етапі пароповітряна суміш проходить рекуперативний теплообмінник 11 де відбувається часткова конденсація вуглецю чотири хлористого. Повне вилучення розчинника із відпрацьованого повітря здійснюється в конденсаторі 15. Далі очищене повітря викидається в атмосферу через димову трубу 19. На виході із теплообмінника 11 і конденсатора 15 передбачені конденсатовідвідники 16 і 17, призначені для відводу отриманого конденсату, який далі збирається у ємності 18. Регенований вуглець чотири хлористий повторно може використовуватись для приготування плівкоутворюючих розчинів. Запропонована технологічна схема є екологічно безпечною, оскільки відсутні викиди в атмосферу забруднюючих речовин. Використання теплоти відпрацьованих газів дозволить зменшити енергетичні витрати на здійснення процесу капсулювання добрив.

Капсулювання невеликих партій дисперсних матеріалів пропонується проводити в установці періодичної дії, схема якої приведена на рис.2.2.

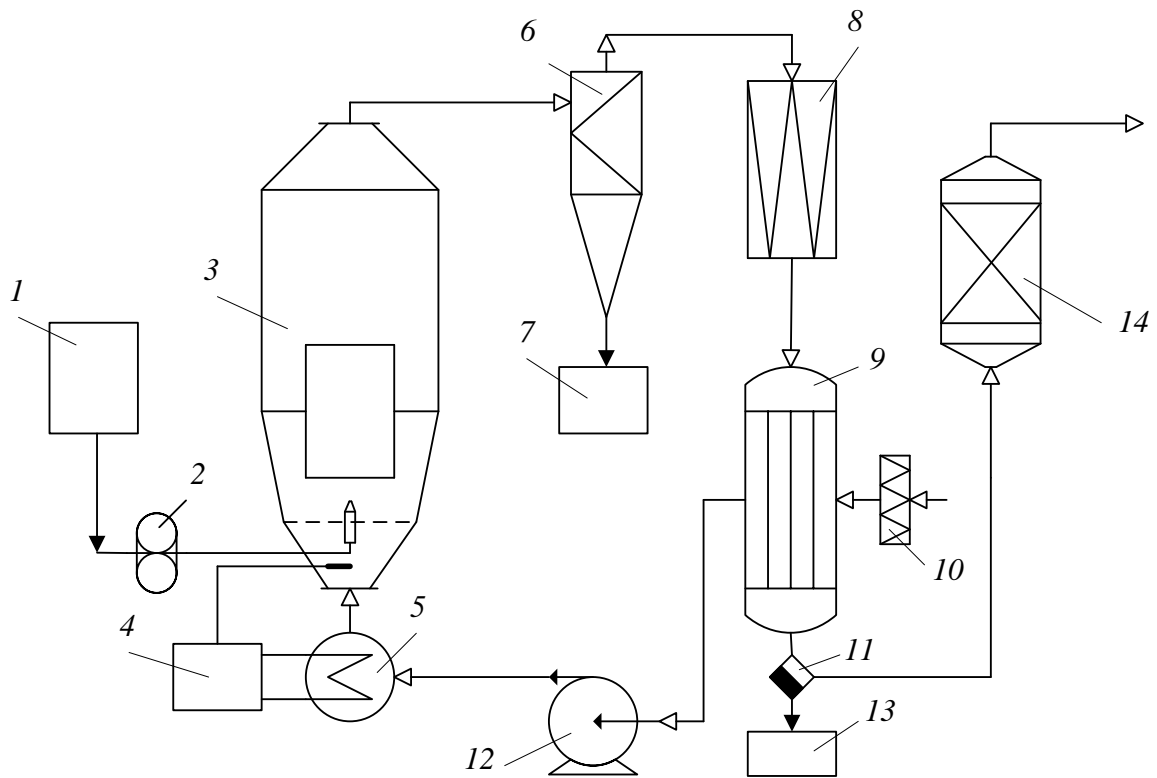


Рисунок 2.2 - Технологічна схема капсулювання гранульованих мінеральних добрив в апараті періодичної дії:

1-ємність із плівкоутворюючим розчином; 2-насос-дозатор; 3-апарат ПШ; 4-електронний блок регулювання температури; 5-електрокалорифер; 6-циклон; 7-збірник пиловидних часток; 8-рукавний фільтр; 9-теплообмінник-рекуператор; 10-матерчатий фільтр; 11-конденсатовідводчик; 12-відцентрова газодувка; 13-збірник конденсату; 14-адсорбер

Основним апаратом представленої схеми (рис.2.2) є апарат псевдозрідженого шару 3 періодичної дії. В процесі капсулювання дрібнодисперсного матеріалу полімерним розчином спостерігається явище злипання, що негативно впливає на якість покриття. При проведенні процесу капсулювання з матеріалами, схильними до злипання застосовують апарати постійного поперечного січення циліндричного типу. Рухаючись по всьому січенню апарату з постійною швидкістю псевдозріджуюче повітря сприяє більш активній поведінці гранул, попереджуючи їх злипання. В таких

апаратах рух частинок є хаотичним. Це призводить до порушень тепло- і масообмінних процесів в шарі. З метою запобігання можливих небажаних явищ в шарі твердих частинок, впорядкування їх циркуляції використовуються апарати, що обладнані направляючими перегородками. Вертикальні перегородки різної форми служать для розділення шару частинок на зони покриття і зони сушіння. При цьому в зоні покриття встановлюється розпилюючий пристрій. Гранули, що попали в зону покриття через зазор між нижньою частиною перегородки і газорозподільчою решіткою, зрошуються розпиленим розчином і через верхній раструб попадають в зону сушіння. Тут створюються умови спокійного псевдозрідження за рахунок зниження швидкості повітря. Осідаючі частинки знову попадають в зону покриття. Газорозподільча решітка в області під зоною покриття має більший відсоток живого січення. Це дає змогу створювати висхідний потік гранул, подаючи в зону покриття більше повітря [16].

Приймаючи до уваги властивості матеріалів для реалізації процесу доцільно застосовувати конічно-циліндричний апарат з направляючим циліндром.

Капсулювання за запропонованою схемою розпочинається із завантаження мінерального добрива в робочу камеру апарату 3. Далі вмикається газодувка для подачі псевдозріджуючого повітря 12 та електрокалорифер 5. На цьому етапі проходить знепилення шару матеріалу та вихід на температурний режим роботи. Дрібні пилоподібні часточки матеріалу вловлюються циклоном 6 та рукавним фільтром 8. При досягненні заданої температури за допомогою насосу-дозатора 2 здійснюється подача в шар матеріалу плівкоутворюючого розчину із заданою інтенсивністю. Нанесення покриття триває до досягнення необхідної товщини оболонки. Відпрацьована пароповітряна суміш проходить через рекуперативний теплообмінник 9. Конденсат розчинника виводиться за допомогою конденсатовідвідника 11 та поступає у збірник конденсату 13. Несконденсовані пари розчинника поглинаються із відпрацьованого повітря адсорбером 14. Очищене повітря

викидається із установки. В рекуперативному теплообміннику 9 в режимі виходу на температурний режим та нанесення покриття здійснюється підігрівання псевдозріджуючого повітря теплом відпрацьованого газу. Робочу температуру повітря забезпечує електричний калорифер 5 за допомогою блоку регулювання 4.

Після досягнення заданої товщини покриття вимикається калорифер, шар частинок охолоджується псевдозріджуючим повітрям. В цей час проходить досушування покриття. При досягненні кінцевої температури матеріалу, газодувка зупиняється і матеріал вивантажується із робочої камери апарату.

Апарати періодичної дії дають можливість отримувати більш якісне покриття, на відміну від неперервних [16]. Доцільність їх використання обумовлюється вимогами до капсульованих матеріалів та економічними чинниками.

## **Висновки**

1.Проведені дослідження показали можливість біологічної деструкції відходів полістиролу із прогнозованою динамікою.

2.Розроблено статистичну модель для оцінювання ступені біодеструкції полістиролу в залежності від вмісту природнього полісахариду та вологості ґрунту.

3.Максимальна ступінь деструкції полістиролу у встановлених умовах складала 22%. Прогнозована деструкція упродовж шести місяців очікується в межах 30÷100%, що дасть змогу забезпечити пролонговане вивільнення компонентів капсульованих добрив та уникнути вторинного забруднення ґрунтового середовища залишковими полімерами.

4.Розглянуті основні етапи технології утилізації відходів полістиролу у виробництві капсульованих мінеральних добрив.

5.Запропоновано принципові технологічні схеми для неперервного та періодичного капсулювання гранульованих мінеральних добрив.

## Література

1. Пхакадзе Г. А. Биодеструктурируемые полимеры / Г. А. Пхакадзе. – К.: Наук. думка, 1990. – 159 с., ил.
2. Городній М.М. Агрохімія / М.М. Городній.-К.:“Вища школа”. – 1990. – 288с.
3. Aamer Ali Shah. Biological degradation of plastics: A comprehensive review / Aamer Ali Shah, Fariha Hasan, Abdul Hameed, Safia Ahmed.: Biotechnology Advances. Vol. 26. – 2008. – P. 246–265.
4. Штарке Л. Использование промышленных и бытовых отходов пластмас: Пер. с нем./ Штарке Л., под ред. В.А. Брагинского. – Л.: Химия, 1987. – 176с.
5. Иващенко Г.В. Использование бактерий деструкторов родов *Pseudomonas* и *Achromobacter* для детектирования и деструкции полициклических и ароматических углеводов / Г.В. Иващенко, И.Н. Семенчук // Український біохімічний журнал. - Том. 73. - №1. - 2001. - С. 148-152.
6. Кучерявий В.П. Екологія / В.П.Кучерявий. – Львів, в-во «Світ», 2000, 499 с.
7. Принципи моделювання та прогнозування в екології / [В.В. Богобожий, К.Р. Курбанов, П.Б. Палій, В.М. Шмандій]: Підручник. – Київ: Центр навчальної літератури, 2004. – 216 с.
8. Кафаров В.В. Методы кибернетики в химической технологии / В.В. Кафаров // Изд. 3-е, пер. и доп. – М. – “Химия”, 1976. – 464 с.
9. Позняк С.П. Ґрунтознавство і географія ґрунтів. У двох частинах. - Львів: ВЦ ЛНУ імені Івана Франка, 2007. – 400 с.
10. "Про внесення змін до деяких законодавчих актів України у сфері поводження з відходами" Закон України від 21 січня 2010 року № 1825-VI//ВВР. - № 10. – с.107.
11. Наказ Міністерства регіонального розвитку, будівництва та житлово-комунального господарства України від 01.08.2011 № 133 Про затвердження Методики роздільного збирання побутових відходів; Зареєстровано в Міністерстві юстиції України 10 жовтня 2011 р. за № 1157/19895.



12. Z.Wielgosz Zastosowanie polimerow do nawozow o spowolnionym dzialaniu / Z.Wielgosz, A. Winiarski, M.Krzeczynska, J.Pasternacki // Prace naukowe instytutu technologii nieorganicznej I nawozow mineralnych politechniki Wroclawskiej. – 1996. - № 45. – S.61-69.
13. Polimery Degradowalne //Third international students' conference environment development engineering. – 30 may – 2 June 2002. – Cracow p. 33-38.
14. Coating composition for slow release fertilizer formulations: Пат. 5264019 США, МКИ<sup>5</sup> C05П 3/10 / Gossett John R., Kirk Shane Kk.,; Estman Kodak Co.-№С 05 G 3/10; Заявл. 5.3.91; Опубл 23.11.93; НКИ 71/64.07.
15. О.А.Нагурський. Закономірності капсулювання речовин у стані 33псевдо зрідження та їх дифузійного вивільнення. Монографія / О.А.Нагурський. – Львів: Видавництво Львівської політехніки, 2012. – 188 с.
16. Овчинников, Л.Н. Капсулирование минеральных удобрений во взвешенном слое: 33севдо зрі / Л.Н.Овчинников, А.Г.Липин Иван. Гос. Хим.-технол. Ун-т. – Иваново, 2011. – 140 с.

## Анотація

**Актуальність роботи.** Сьогодні відходи розглядають не тільки як фактор забруднення довкілля, але й як суттєвий потенціал вторинної сировини. Актуальним є застосування полімерних відходів в якості вторинних матеріальних ресурсів. Це стосується, в першу чергу, тих полімерних виробів, які в процесі використання практично не втратили своїх властивостей. До них належать виготовлені з полістиролу пластикова упаковка, одноразовий посуд, тощо – вироби із коротким терміном експлуатації. В середньому, серед побутових відходів частка таких відходів становить близько 10% і щорічно зростає. Дана ситуація не розглядається як комплексна взаємозалежна еколого-економічна та технологічна проблема. Актуальним є розроблення методів утилізації відходів полістиролу у технологіях створення екологічно безпечних капсульованих мінеральних добрив.

**Мета роботи.** Метою роботи є зниження забруднення довкілля відходами полістиролу методом створення здатної до безпечної біодеструкції плівкоутворюючої композиції, призначеної для капсулювання гранульованих добрив.

**Завдання дослідження.** Для досягнення зазначеної мети необхідним було вирішити такі завдання:

- виконати критичний аналіз літератури з проблем накопичення використаного пластмасового посуду як вторинної сировини;
- дослідити процес біологічної деструкції полістиролу, який використовується для капсулювання мінеральних добрив;
- запропонувати принципові технологічні схеми капсулювання гранульованих мінеральних добрив.

### **Методики досліджень.**

Величину деструкції полімеру можна оцінювати за допомогою його молекулярної маси, яка на пряму пов'язана із довжиною молекулярного ланцюга. Для визначення в'язкості розчинів полімерів використовували віскозиметр Оствальда-Пінкевича. Віскозиметр являє собою U – подібну

трубку. Одне коліно трубки має циліндричну форму з резервуаром в нижній частині. В другому коліні є два кулеподібні розширення, які закінчуються капіляром діаметром 0.5...2 мм. Вище та нижче нижнього кулястого розширення нанесені мітки.

Вимірювання виконували в два етапи. На першому етапі вимірювали час витікання чистого розчинника. Для цього у резервуар віскозиметра через воронку заливали 10 мл розчинника; віскозиметр поміщали у термостат і витримували 15 хв. Через гумову трубку з допомогою груші розчинник засмоктували вище верхньої мітки. Грушу від'єднували, рідина починала переливатись з верхньої кульки в нижню. Як тільки рівень рідини опуститься до верхньої мітки – включали секундомір. В момент проходження рідиною другої мітки секундомір виключали. Записували результати вимірювань. Дослід повторювали 3 рази і обраховували середнє значення часу витікання розчинника ( $\tau_0$ ).

На другому етапі визначали швидкість витікання попередньо приготовлених декількох розчинів полімерів різної концентрації (0.125, 0.25 та 0.5). З розчинами полімерів повторювали попередню процедуру.

На основі отриманих даних будували криву залежності  $\frac{\eta_{num}}{C}$  від  $C$ , продовжували її до пересічення з віссю ординат і за значенням  $\frac{\eta_{num}}{C}$  в точці перетину і за даними таблиці значень коефіцієнтів  $K$  та  $\alpha$  розраховували величину молекулярної маси.

Таблиця значень коефіцієнтів  $K$  та  $\alpha$

| Полімер    | Розчинник | Темп., °С | $K \cdot 10^4$ | $\alpha$ | $M \cdot 10^4$ |
|------------|-----------|-----------|----------------|----------|----------------|
| полістирол | толуол    | 25        | 1,7            | 0,69     | 3,0 - 1700     |

Дана методика не містить трудомістких стадій хімічного аналізу. Віскозиметричний метод визначення молекулярної маси полімерів широко використовується у полімерній промисловості як найбільш простий та

оптимальний метод та дає змогу отримувати достовірні дані у процесі досліджень біологічного розкладу полімерів.

**Загальна характеристика наукової роботи.** Наукова робота складається зі вступу, 2 розділів, висновків та списку використаної літератури. Обсяг роботи становить 27 сторінок. У роботі наведено 9 таблиць, 9 рисунків.

**Ключові слова:** полістирол, відходи, біодеструкція, капсульовані добрива.