

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
СУМСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

ОСТРОГА Руслан Олексійович

УДК 661.152.4:66.096.5

**ПРОЦЕС ПОКРИТТЯ ГРАНУЛ МІНЕРАЛЬНИХ ДОБРИВ
ОРГАНІЧНОЮ СУСПЕНЗІЄЮ**

05.17.08 – процеси та обладнання хімічної технології

Автореферат
дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Суми – 2014

Дисертацією є рукопис

Робота виконана в Сумському державному університеті Міністерства освіти і науки України

Науковий керівник: кандидат технічних наук, доцент
Юхименко Микола Петрович,
Сумський державний університет,
доцент кафедри процесів та обладнання хімічних і
нафтопереробних виробництв.

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор
Атаманюк Володимир Михайлович,
Національний університет «Львівська політехніка», м. Львів,
завідувач кафедри хімічної інженерії;

кандидат технічних наук, професор
Моїсєєв Віктор Федорович,
Національний технічний університет «Харківський
політехнічний інститут», м. Харків,
професор кафедри хімічної техніки та промислової екології.

Захист відбудеться 31 жовтня 2014 року об 11⁰⁰ годині на засіданні спеціалізованої вченої ради К 55.051.04 у Сумському державному університеті (40007, м. Суми, вул. Римського-Корсакова, 2, ауд. Ц-204).

З дисертацією можна ознайомитися в бібліотеці Сумського державного університету (40007, м. Суми, вул. Римського-Корсакова, 2).

Автореферат розісланий «29» вересня 2014 року.

Вчений секретар спеціалізованої
вченої ради К 55.051.04,
кандидат технічних наук, доцент

Гурець Л.Л.

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність роботи. На сьогоднішній день виробництво та раціональне використання добрив є надзвичайно актуальним для агропромислового комплексу, а для науки – поштовхом для пошуку природозберігаючих технологій виробництва і використання добрив. Реально зменшити напругу в забезпеченні рослинництва мінеральними добривами можна за рахунок переробки та використання відходів сільськогосподарського виробництва. Саме тому для підвищення ефективності виробництва продукції сільського господарства потрібна розробка екологічнобезпечних технологій з максимальним залученням вторинних ресурсів, якими є відходи тваринництва, птахівництва, рослинництва та переробної промисловості.

В асортименті азотних добрив, що використовуються в усіх ґрунтово-кліматичних зонах, переважають аміачна селітра і карбамід. Вони трансформуються в системі ґрунт-рослина і активно включаються у загальнобіологічний кругообіг азоту, забезпечуючи потреби вегетуючих рослин в азоті. Але поряд із відомими перевагами, ці форми азотних добрив мають істотні недоліки – високу розчинність у воді, підвищену вимиваемість з орного шару, що призводить до забруднення поверхневих і підземних вод. Крім того, використання високих доз добрив часто пов'язане з накопиченням в основній сільгосппродукції, а також у ґрунті, значної кількості нітратного азоту, що призводить до погіршення екології та зниження якості продукції.

У зв'язку з цим конче необхідне створення таких форм азотних добрив, які мають знижену фізіологічну кислотність і пролонговану дію, забезпечуючи ефективне використання азоту протягом усього періоду вегетації. Насамперед це вирішується за допомогою їх капсулювання.

Великий практичний інтерес представляють методи поліпшення якості добрив, які значно не ускладнюють технологічний процес їх виробництва і не потребують використання дефіцитних і дорогих реагентів і кондиціонуючих домішок. Тому використання в якості капсульної оболонки органічних відходів є дуже актуальним, оскільки вирішує питання одержання органо-мінерального добрива пролонгованої дії і одночасно проблему утилізації органічних відходів птахофабрик. Отримане таким чином добриво має пролонговану дію і більш продуктивно живить рослину протягом тривалого часу, а завдяки органічному походженню матеріалу оболонки – не забруднює ґрунт та довкілля.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертаційна робота виконана на кафедрі процесів та обладнання хімічних і нафтопереробних виробництв Сумського державного університету в межах державної тематики «Розробка та дослідження вискоефективних апаратів для процесів масообміну, кристалізації та класифікації» (номер державної реєстрації 0110U001953). Термін виконання: 2010-2014 р. Замовник – Міністерство освіти і науки України.

Мета і задачі дослідження. Мета дисертаційної роботи полягає у дослідженні основних закономірностей процесу утворення капсульованих органічною речовиною мінеральних добрив пролонгованої дії та встановленні оптимальних режимно-технологічних параметрів роботи основного технологічного обладнання.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити наступні завдання:

1. Обґрунтувати фізичну модель утворення капсульованих мінеральних добрив пролонгованої дії.
2. Дослідити механізм нанесення органічної оболонки на гранульовані мінеральні добрива в апараті псевдозрідженого шару.
3. Встановити гідравлічні закономірності киплячого шару гранул карбаміду при їх покритті суспензією курячого посліду.
4. Встановити закономірності теплообміну між тепловим агентом та шаром дисперсного матеріалу під час випаровування органічної суспензії.
5. Визначити основні технологічні параметри покриття гранул карбаміду суспензією курячого посліду та запропонувати шляхи практичної реалізації даного процесу.
6. Розробити математичну модель та методику розрахунку процесу покриття гранул мінеральних добрив органічною суспензією.
7. Провести експериментальні дослідження для визначення ефективності дії отриманого продукту.
8. Запропонувати технологічну схему установки для покриття гранул мінеральних добрив суспензією курячого посліду.

Об'єкт дослідження: процес покриття гранульованих добрив органічною оболонкою.

Предмет дослідження: вплив режимно-технологічних параметрів на процес покриття гранульованого карбаміду суспензією курячого посліду в апараті псевдозрідженого шару.

Методи дослідження. У роботі використовували методи фізичного та математичного (комп'ютерного) моделювання під час покриття гранул мінеральних добрив у стані псевдозрідження. Проведено експериментальне обстеження режимних параметрів роботи основного технологічного обладнання лабораторної установки капсулювання мінеральних добрив. Визначення гранулометричного складу частинок проводили методом ситового аналізу. Для визначення структури двошарових органо-мінеральних гранул використовували мікроскопічний метод. Концентрацію цільового компонента у водному розчині визначали кондуктометричним методом. Опрацювання та узагальнення експериментальних даних виконували за допомогою комп'ютерної техніки та прикладних програмних пакетів.

Наукова новизна одержаних результатів:

- встановлено характерні температурні режими процесу капсулювання гранул карбаміду суспензією курячого посліду та визначено оптимальний (робочий) режим;
- визначено вплив рідкого курячого посліду на гідродинаміку процесу капсулювання гранул карбаміду в апараті псевдозрідженого шару з форсунковим розпилюванням;
- отримано критеріальну залежність, яка дає можливість прогнозувати значення коефіцієнта тепловіддачі для процесу покриття гранул карбаміду суспензією курячого посліду;

- отримано емпіричне рівняння для розрахунку збільшення середньозваженого діаметра полідисперсних гранул карбаміду, капсульованих суспензією курячого посліду;
- розроблено математичну модель процесу покриття гранул мінеральних добрив органічною суспензією, яка враховує зміну щільності розподілу гранул за розміром.

Практичне значення одержаних результатів. На основі аналізу та узагальнення експериментальних результатів отримані теоретичні залежності кінетики росту гранул у киплячому шарі, які дозволяють прогнозувати енергетичні витрати на створення капсульованих орґано-мінеральних гранул та оптимізувати процес. Розроблена методика розрахунку процесу та запропонована технологічна схема установки покриття гранул мінеральних добрив суспензією органіки дають змогу збільшити економічні показники даного виробництва. Результати дисертаційної роботи передано Державному підприємству “Сумський державний науково-дослідний інститут мінеральних добрив і пігментів” для використання їх у розробці вихідних даних на проектування та техніко-комерційних пропозицій.

Особистий внесок здобувача. Основні результати, що складають сутність дисертаційної роботи, отримані особисто здобувачем, а саме: критичний аналіз джерел літератури та стану проблем у застосуванні гранульованих мінеральних добрив, створення лабораторної установки та проведення експериментальних досліджень, розробка фізичної та математичної моделей досліджуваного процесу. Обговорення та аналіз отриманих результатів виконано разом із науковим керівником.

Апробація результатів дисертації. Основні положення дисертаційної роботи доповідались та обговорювались на: науково-технічних конференціях викладачів, співробітників, аспірантів і студентів факультету технічних систем та енергоефективних технологій “Сучасні технології у промисловому виробництві” (м. Суми, 2011, 2013); II та III Всеукраїнських міжвузівських науково-технічних конференціях “Сучасні технології у промисловому виробництві” (м. Суми, 2012, 2014); Міжнародній науково-практичній конференції “Актуальные проблемы науки и образования в области естественных и сельскохозяйственных наук” (м. Петропавлівськ, Казахстан, 2012); XIV Міжнародній науковій конференції “Удосконалення процесів та обладнання харчових та хімічних виробництв” (м. Одеса, 2012); I Міжнародній науково-технічній конференції “Хімічна технологія: наука та виробництво” (м. Шостка, 2012); IX Міжнародній конференції “Стратегія якості у промисловості і освіті” (м. Варна, Болгарія, 2013); III Міжнародному молодіжному фестивалі наук “Хімія та хімічна технологія” ССТ-2013 (м. Львів, 2013); Міжнародній науково-практичній Інтернет-конференції “Перспективные инновации в науке, образовании, производстве и транспорте” (2013).

Публікації. Основні результати дисертаційної роботи опубліковано у 15 друкованих працях, з них 7 статей, 5 з яких опубліковані у наукових фахових виданнях України, 2 статті – у зарубіжних виданнях, 7 тез доповідей у збірниках матеріалів конференцій та 1 патент України на корисну модель.

Структура та обсяг дисертації. Дисертаційна робота складається зі вступу, п'яти розділів, висновків, списку використаних джерел на 13 сторінках, що охоплює 126 найменувань, та додатків. Загальний обсяг дисертації становить 139 сторінок, містить 51 рисунок, 10 таблиць по тексту і додатки на 9 сторінках.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ

У вступі обґрунтовано актуальність теми дисертаційної роботи, визначено зв'язок з науковими програмами, планами, темами, сформульовані мета і задачі досліджень, наведені наукова новизна та практичне значення одержаних результатів, відомості щодо апробації результатів.

У першому розділі зазначені основні проблеми у застосуванні гранульованих мінеральних добрив, розглянута можливість покриття мінеральних гранул товстим шаром органічної речовини, що забезпечить довготривалість їх дій на ґрунт та рослину. Також проведено критичний аналіз існуючих математичних моделей процесів зневоднення і гранулювання вологих систем та огляд технологічного обладнання.

Проблемами зневоднення і гранулювання вологих систем займалися: Классен П.В., Гришаєв І.Г., Кочетков В.Н., Вілесов Н.Г., Козакова Є.О., Тодес О.М., Каганович Ю.Я., Муштаєв В.І., Мухленов І.П., Девідсон Д.Ф., Харрісон Д., Кувшинніков І.М., Шахова Н.А., Матур К., Епстайн Н., Гельперін Н.І., Айнштейн В.Г., Ліпін О.Г., Демчук І.А., Овчинніков Л.М., Марчевський В.М., Нагурський О.А. та ін.

Доведена можливість утилізації органічних відходів, що містять цінні компоненти, обґрунтовує необхідність і доцільність застосування екологічно безпечних органо-мінеральних добрив, які пропонується отримувати шляхом покриття гранул мінеральних добрив суспензією курячого посліду в апараті киплячого шару з форсунковим розпиленням.

У другому розділі наведено основні фізико-хімічні характеристики матеріалів, що використовуються для експериментальних досліджень, схему експериментальної установки, оцінку похибок вимірювання. У якості ядра використовувалося гранульоване мінеральне добриво – карбамід, яке в процесі досліджень покривалося суспензією пташиного посліду. Дослідження процесу капсулювання гранул мінеральних добрив органічною оболонкою проводилися на спеціально створеній лабораторній установці (рисунок 1).

Наведено методики дослідження гідравлічних закономірностей та теплообміну процесу капсулювання, а також кінетики росту гранул у киплячому шарі. Динаміку вивільнення цільового компонента з-під захисної оболонки визначали кондуктометричним методом згідно європейської норми EN 13266:2001. Для визначення концентрації азоту у воді застосовували портативний кондуктометр.

Тестові дослідження статичної міцності органо-мінеральних гранул пролонгованої дії проводили згідно ГОСТ 21560.2-82.

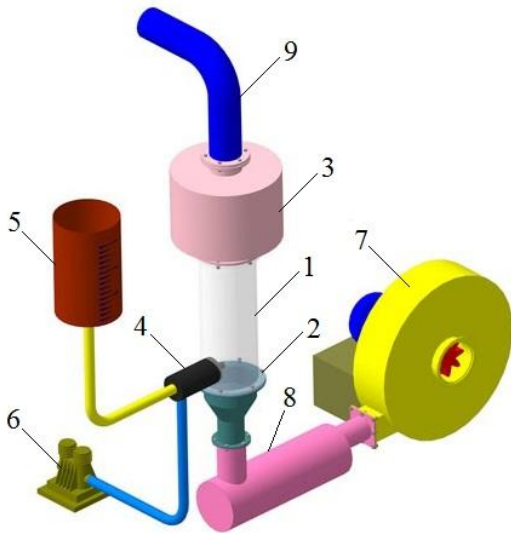


Рисунок 1 – Схема експериментальної установки для капсулювання добрив: 1 – продуктова камера; 2 – газорозподільна решітка; 3 – кришка апарата; 4 – пневматична форсунка; 5 – мірний бачок; 6 – компресор; 7 – газодувка; 8 – калорифер; 9 – гофра

Специфіка киплячого шару при капсулюванні складається з багаторазового змінення температури на поверхні гранул. На прикладі однієї частинки це відбувається наступним чином (рисунок 2).

У прирешіточній зоні гранула обдувається гарячим повітрям і має температуру, близьку до температури повітря. Для забезпечення усталеного киплячого шару необхідно виконання умови пневмотранспорту гранули ($\Sigma F=0$): тобто сила земного тяжіння гранули ($m \cdot g$) врівноважується силою, яку прикладає повітря до її поверхні (F_{Π}), та архімедовою силою (F_A). Потім гранула потрапляє в зону зрошення, де в більшій або меншій мірі покривається шаром суспензії – це супроводжується різким зниженням її температури. Гранула стає важкою і знову опускається у прирешіточну зону (зону сушки), де контактує з потоком гарячого повітря – вода або розчин випаровується, а на поверхні мінеральної гранули утворюється шар сухої органічної речовини, збільшуючи завдяки цьому об'єм та діаметр гранули. Далі процес повторюється. Нарощування значного шару оболонки відбувається протягом багатьох таких циклів.

У третьому розділі обґрунтовано фізичну модель процесу покриття гранул мінеральних добрив органічною суспензією. Особливістю використання в якості матеріалу захисної оболонки курячого посліду є нанесення на поверхню мінеральної гранули не розчину, як це відбувається у випадку гранулювання мінеральних добрив, а суспензії. У такому випадку механізм росту гранул істотно залежить від специфіки суспензії та режиму процесу капсулювання, що визначають характер взаємодії диспергованої суспензії з дисперсною твердою фазою.

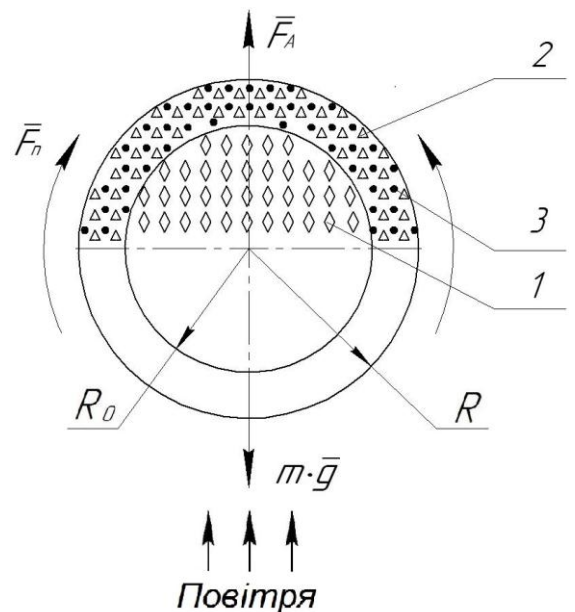


Рисунок 2 – Схема взаємодії частинки, покритої органічною суспензією, з повітрям: 1 – мінеральна речовина; 2 – суха органічна речовина; 3 – волога

Дослідним шляхом визначено температурний інтервал (40-80°C), коли відбувається зчеплення органічної речовини з поверхнею гранул. У цьому діапазоні були встановлені три характерні режими процесу капсулювання:

1) при температурі шару в межах 40-50°C крапля суспензії не розтікається по поверхні, а закріплюється з однієї сторони гранули, утворюючи при висиханні міцний нарост, який за своїми розмірами відповідає розмірам краплі (рисунок 3, *а*);

2) при підвищенні температури шару до 60-65°C крапля суспензії розтікається по поверхні гранули і починає інтенсивно випаровуватися рідина, утворюючи при висиханні тонкий міцний шар сухої органіки (рисунок 3, *б*);

3) подальше підвищення температури шару (70-80°C) призводить до утворення нерівномірної поверхні з глибокими тріщинами – це супроводжується сколюванням органічної речовини в окремих місцях гранули, утворюючи при цьому нові органічні центри грануляції (рисунок 3, *в*).

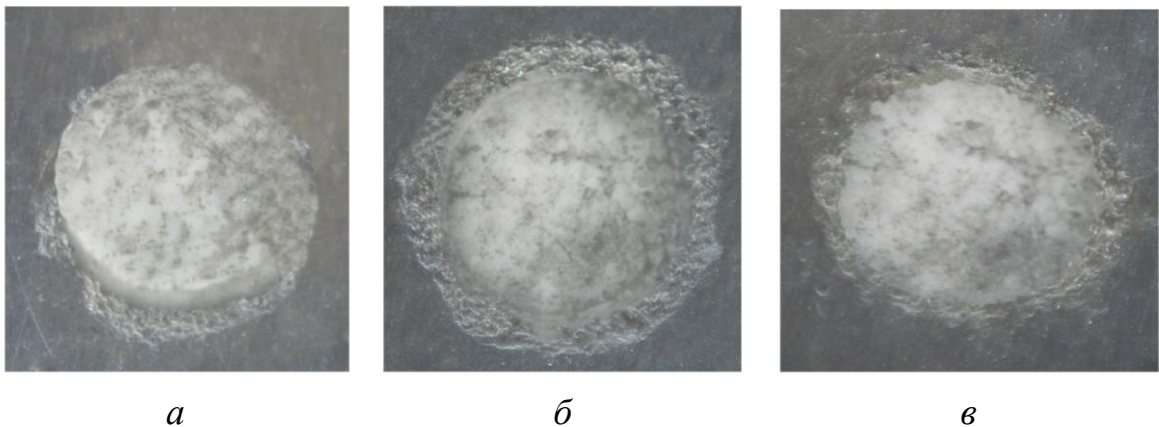


Рисунок 3 – Зрізи гранул карбаміду, покритих курячим послідом (збільшення в 20 разів), що одержані при відповідному температурному режимі: *а* – однобічному (40-50°C); *б* – оболонковому (60-65°C); *в* – нерівномірному з тріщинами (70-80°C)

При дуже високій температурі (більше 90°C) відбувається висушування суспензії в об'ємі, коли вона ще не досягла поверхні гранули – це призводить до утворення пилу, який складається з дуже дрібних часток різного розміру та форми.

Основним показником якісного покриття у випадку капсулювання гранул мінеральних добрив суспензією курячого посліду є рівномірно розподілена по всій поверхні гранули оболонка визначеної товщини, яка сприяє повному залученню мінеральних ядер. Отже, робочим є оболонковий режим, що дозволяє доростити всі гранули до товарного розміру (4-5 мм) (рисунок 4).



Рисунок 4 – Загальний вигляд органо-мінеральних гранул пролонгованої дії

Процес капсулювання гранул карбаміду курячим послідом в лабораторних умовах має раціональні режимно-технологічні параметри (таблиця 1).

Таблиця 1 – Режимно-технологічні параметри процесу капсулювання в апараті киплячого шару

ПАРАМЕТР	ЗНАЧЕННЯ	
Витрата суспензії (курячий послід), <i>мл/хв</i>	10	20
Маса мінеральних гранул в апараті, <i>кг</i>	0,5	
Середньозважений діаметр вихідних гранул, <i>мм</i>	2	
Швидкість повітря, <i>м/с</i>	4,8	
Гідравлічний опір, <i>Па</i>	580	610
Температура повітря під решіткою, <i>°C</i>	80	
Температура повітря в шарі дисперсного матеріалу, <i>°C</i>	65	
Час проведення процесу, <i>хв</i>	50	
Доля органічної оболонки, <i>% мас.</i>	35	50

Для подальшого прогнозування гідравлічних закономірностей зважених гранул при їх покритті суспензією курячого посліду проводили узагальнення експериментальних досліджень (рисунок 5), результати яких було представлено у вигляді залежності безрозмірних величин $\Delta P_{\Sigma} / \Delta P_C = f(l_{\text{ПІТ}} / g_{\text{ПІТ}})$ (рисунок 6).

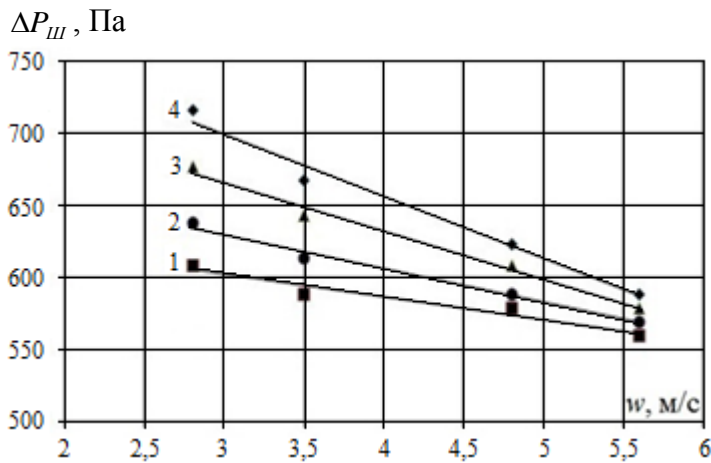


Рисунок 5 – Залежність гідравлічного опору зважених гранул карбаміду від швидкості повітря за різної питомої витрати суспензії $l_{\text{ПІТ}}$, $\text{кг}/(\text{с}\cdot\text{м}^2)$: 1 – 0,00657; 2 – 0,00887; 3 – 0,0131; 4 – 0,0164

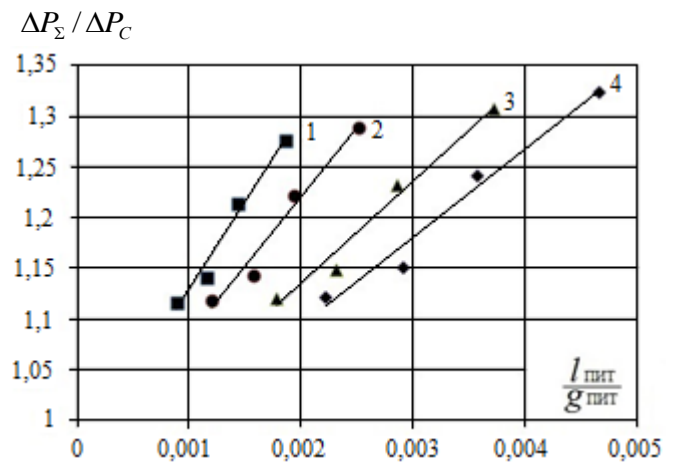


Рисунок 6 – Графічна залежність $\Delta P_{\Sigma} / \Delta P_C = f(l_{\text{ПІТ}} / g_{\text{ПІТ}})$ при питомій витраті суспензії $l_{\text{ПІТ}}$, $\text{кг}/(\text{с}\cdot\text{м}^2)$: 1 – 0,00657; 2 – 0,00887; 3 – 0,0131; 4 – 0,0164

Для розрахунків приймали, що залежність $\Delta P_{\Sigma} / \Delta P_C$ від $l_{\text{ПІТ}} / g_{\text{ПІТ}}$ є лінійною, тобто має наступний вигляд:

$$\frac{\Delta P_{\Sigma}}{\Delta P_C} = A \cdot \left(\frac{l_{\text{ПІТ}}}{g_{\text{ПІТ}}} \right) + B. \quad (1)$$

Провівши апроксимацію експериментальних даних, знаходимо значення емпіричних констант A і B . Таким чином, рівняння (1) матиме наступний вигляд:

$$\frac{\Delta P_{\Sigma}}{\Delta P_C} = 3,8 \cdot l_{\text{ПНТ}}^{-0,76} \cdot \left(\frac{l_{\text{ПНТ}}}{g_{\text{ПНТ}}} \right) + 0,95. \quad (2)$$

Експериментальні дослідження укрупнення гранул здійснювалися при одноразовому завантаженні гранульованого матеріалу і двох постійних подачах суспензії (10 та 20 мл/хв). Полідисперсна навіска карбаміду (таблиця 2) з мінімальним діаметром гранул 1,5 мм подавалася на газорозподільну решітку. Завдяки висхідному потоку повітря створювався киплячий шар, у якому, безпосередньо, і відбувалося капсулювання. Через кожні 20 хвилин тривалості процесу лабораторна установка вимикалася і проводився ситовий аналіз гранул. Результати таких дослідів для періодичного режиму роботи апарата наведені на рисунку 7.

Таблиця 2 – Гранулометричний склад карбаміду

Розмір гранул, мм	> 3,5	3 - 3,5	2,5 - 3	2 - 2,5	1,5 - 2	1 - 1,5	< 1
Масова доля, %	0,8	11,5	8,4	72,4	3,2	2,2	1,5

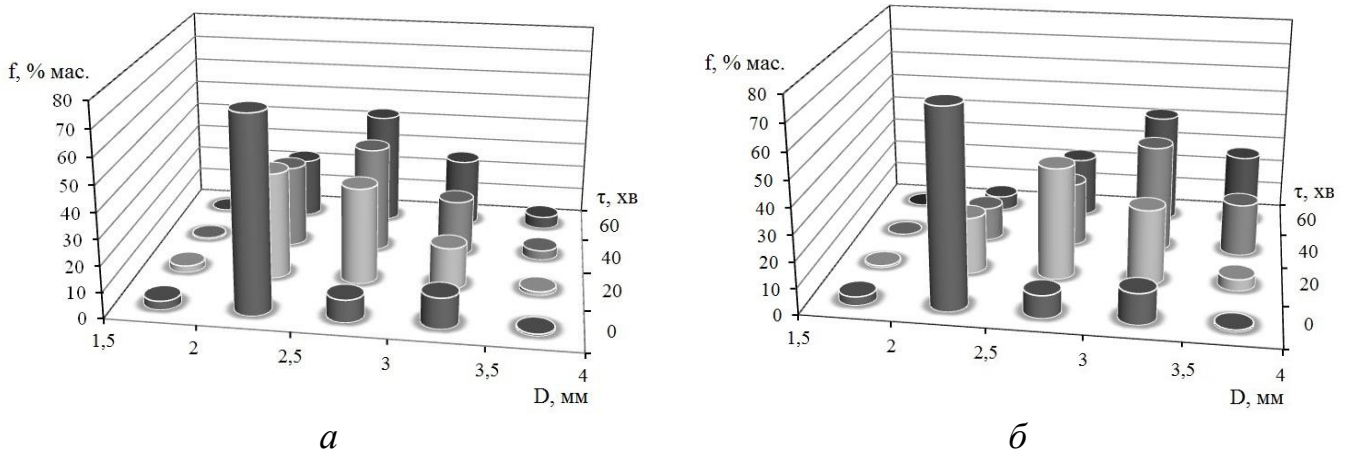


Рисунок 7 – Гістограми розподілу частинок за розмірами в різні моменти часу протягом процесу капсулювання при витраті суспензії: a – 10 мл/хв; b – 20 мл/хв

Отримані на лабораторній установці експериментальні дані показують, що лише для вихідних гранул характерна бімодальна форма кривої розподілу, тобто на чисельній кривій розподілу утворюється два максимуми. У процесі дорощування гранул органічною речовиною крива розподілу змінює свою форму і має один максимум. Це означає, що при робочих умовах капсулювання (таблиця 1) органічна речовина закріплюється на поверхні часток міцним шаром і не відбувається її сколювання в окремих місцях гранули.

Укрупнення полідисперсних гранул у киплячому шарі відстежували по збільшенню їх середньозваженого діаметра за допомогою емпіричного рівняння:

$$D = D_0 \exp\left(\frac{g_0 \cdot \tau}{\psi}\right). \quad (3)$$

Апроксимуючи результати експерименту, рівняння (3) набуває вигляду:

$$D = D_0 \exp\left(\frac{g_0 \cdot \tau}{7,5 \cdot 10^{-4} \cdot \tau + 1,74}\right). \quad (4)$$

Результати теоретичних розрахунків за рівнянням (4) і експериментальних досліджень змінення середньозваженого діаметра частинок протягом процесу капсулювання наведені на рисунку 8.

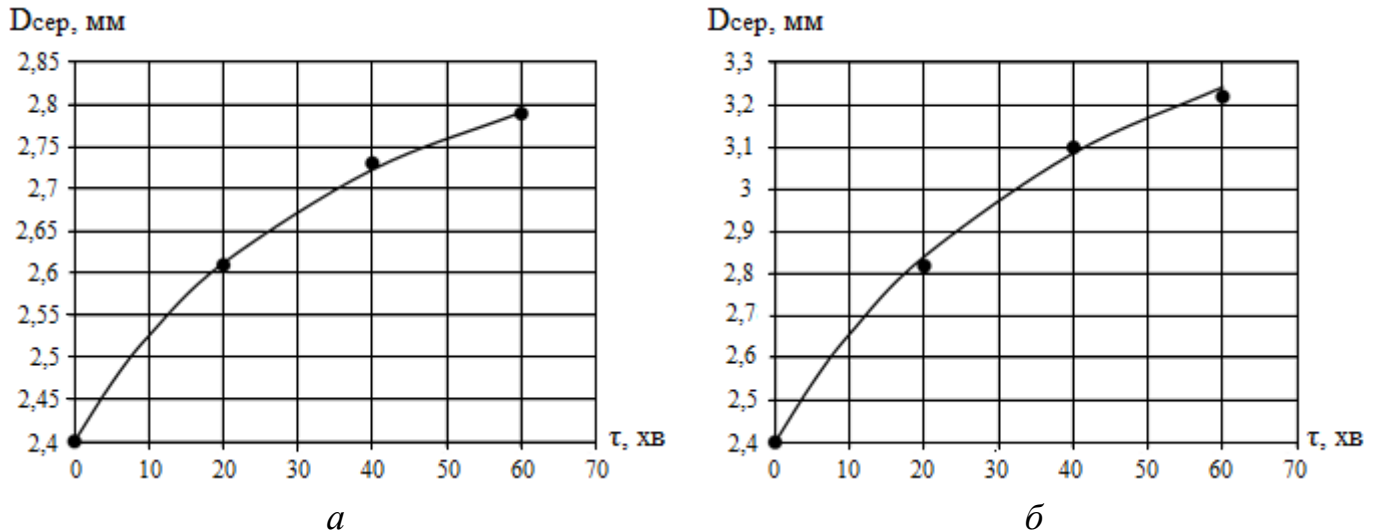


Рисунок 8 – Порівняння теоретичних (лінія) та експериментальних (точки) значень укрупнення середньозваженого діаметра частинок при витраті суспензії: *а* – 10 мл/хв; *б* – 20 мл/хв

На підставі отриманих експериментальних значень проводили розрахунок коефіцієнта тепловіддачі α від теплового агента до поверхні частинок під час випаровування суспензії за рівнянням:

$$\alpha = \frac{Q}{F \cdot (t_H - t_T)}. \quad (5)$$

Кількість теплоти Q , яка залишається в шарі матеріалу визначається за рівнянням:

$$Q = G_{II} \cdot c_{II} \cdot (t_{II1} - t_{II2}). \quad (6)$$

Для розрахунку температури суспензії на поверхні частинок отримана наступна залежність:

$$t_C = \frac{G_{II} \cdot c_{II} \cdot (t_{II1} - t_{II2}) - G_{вунC} \cdot r}{G_C \cdot c_C} + t_{C0}. \quad (7)$$

Якщо припустити, що температура поверхні твердих частинок t_{II} дорівнює температурі суспензії на їх поверхні t_C , то маємо змогу побудувати залежність усередненого коефіцієнта тепловіддачі α від дійсної швидкості зріджуючого повітря w (рисунок 9).

Узагальнення експериментальних результатів проводили за рівнянням:

$$Nu = A \cdot Re^n \cdot Pr^m. \quad (8)$$

Враховуючи, що фізичні параметри повітря змінювалися у вузькому діапазоні, приймали $Nu \sim Pr^{0,33}$. Невідомі коефіцієнти “А” і “n” визначали шляхом представлення експериментальних значень у вигляді залежності $Nu/Pr^{0,33} = f(Re)$ в системі координат з логарифмічним масштабом шкал (рисунок 10).

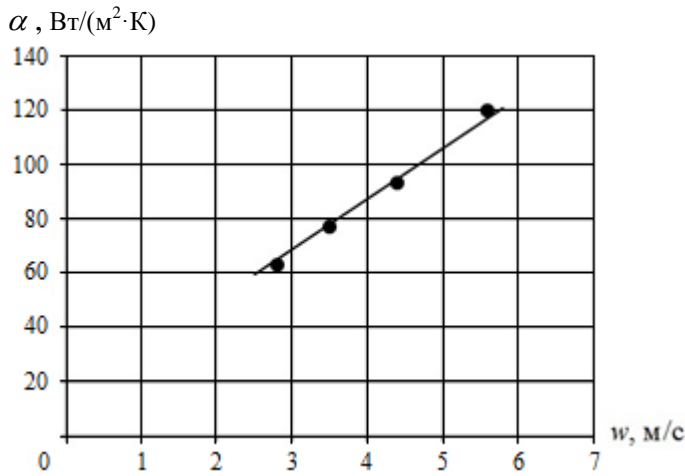


Рисунок 9 – Залежність коефіцієнта тепловіддачі від швидкості зріджуючого повітря при покритті гранул карбаміду суспензією курячого посліду

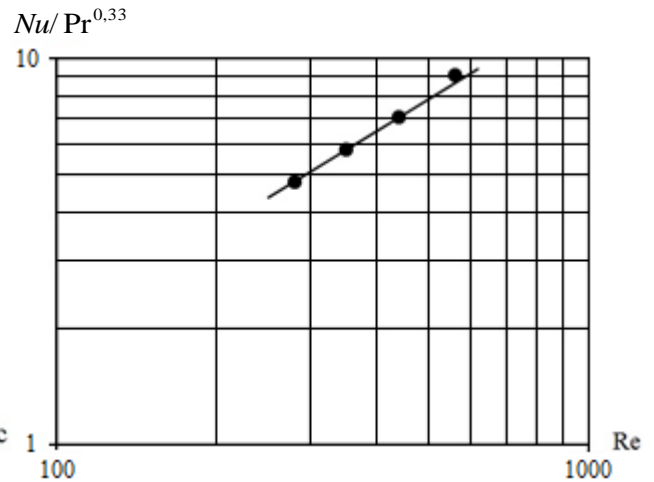


Рисунок 10 – Залежність вигляду $\frac{Nu}{Pr^{0,33}} = f(Re)$

Підставивши значення визначених коефіцієнтів у рівняння (8), отримали:

$$Nu = 0,04 \cdot Re^{0,85} \cdot Pr^{0,33}. \quad (9)$$

За допомогою рівняння (9) маємо змогу прогнозувати значення коефіцієнтів тепловіддачі для процесу покриття гранул карбаміду суспензією курячого посліду з точністю $\pm 8,4 \%$.

У четвертому розділі наведено результати теоретичних досліджень процесів зневоднення і гранулювання органічної суспензії, а також розроблено методику розрахунку процесу покриття гранул мінеральних добрив органічною суспензією.

Принцип киплячого шару використовується в апаратах різних конструкцій, що працюють при різних технологічних режимах, однак процеси росту і ущільнення гранул підкоряються єдиним аналітичним закономірностям.

Зміна маси шару частинок відбувається внаслідок введення органічної суспензії та її випаровування і характеризується наступним рівнянням:

$$\frac{dM_{III}}{d\tau} = G_C - G_{випC}. \quad (10)$$

В ідеальному випадку, коли вся волога випаровується, маємо:

$$M_{III} = G_C \cdot x_{мсC} \cdot \tau + M_{III}^I. \quad (11)$$

Розробка математичної моделі кінетики росту гранул у киплячому шарі ґрунтується на гіпотезі рівномірно-поверхневого зростання, згідно з якою матеріал відкладається на гранулах у вигляді кілець постійної товщини. Також приймали

допущення, що всі частинки в шарі однакового розміру і мають правильну (сферичну) форму (рисунок 11).

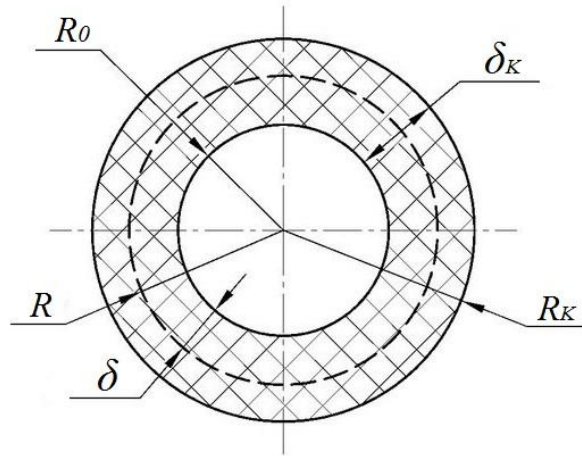


Рисунок 11 – Розрахункова схема частинки, покритої органічною плівкою

Таким чином, збільшення маси шару органічної оболонки на поверхні сферичної частинки можна виразити наступним диференціальним рівнянням:

$$dM = (G_C \cdot x_{m6C}) d\tau = G_0 d\tau. \quad (12)$$

Загальна маса органічної оболонки гранул:

$$M = \rho_{OB} \cdot n \cdot \frac{4}{3} \cdot \pi \cdot (R^3 - R_0^3). \quad (13)$$

Розв'язуючи систему рівнянь (12) і (13), отримуємо залежність, яка дає змогу спрогнозувати значення товщини органічної оболонки в будь-який момент часу:

$$\delta = R_0 \cdot \left(\sqrt[3]{g_0 \cdot \frac{\rho_{GP}}{\rho_{OB}} \cdot \tau + 1} - 1 \right). \quad (14)$$

Результати теоретичних розрахунків за формулою (14) і експериментальних досліджень кінетики нарощування органічної оболонки приведені на рисунку 12.

Дослідні значення задовільно співпадають з теоретичними (розбіжність складає 7÷10 %). Така розбіжність пояснюється тим, що математична модель прораховує ідеальний випадок, коли вся волога, що вноситься з суспензією, випаровується. До того ж, у реальному апараті киплячого шару деякі краплі органічної суспензії разом з повітрям виносяться з робочої зони апарату.

Врівноважити теоретичні значення з експериментальними можна за рахунок коефіцієнта пропорційності k . Відтак рівняння (14) матиме наступний вигляд:

$$\delta = k \cdot R_0 \cdot \left(\sqrt[3]{g_0 \cdot \frac{\rho_{GP}}{\rho_{OB}} \cdot \tau + 1} - 1 \right). \quad (15)$$

Аналіз рисунка 12 показує, що при капсулюванні гранульованого карбаміду суспензією курячого посліду коефіцієнт k гарантовано менший одиниці.

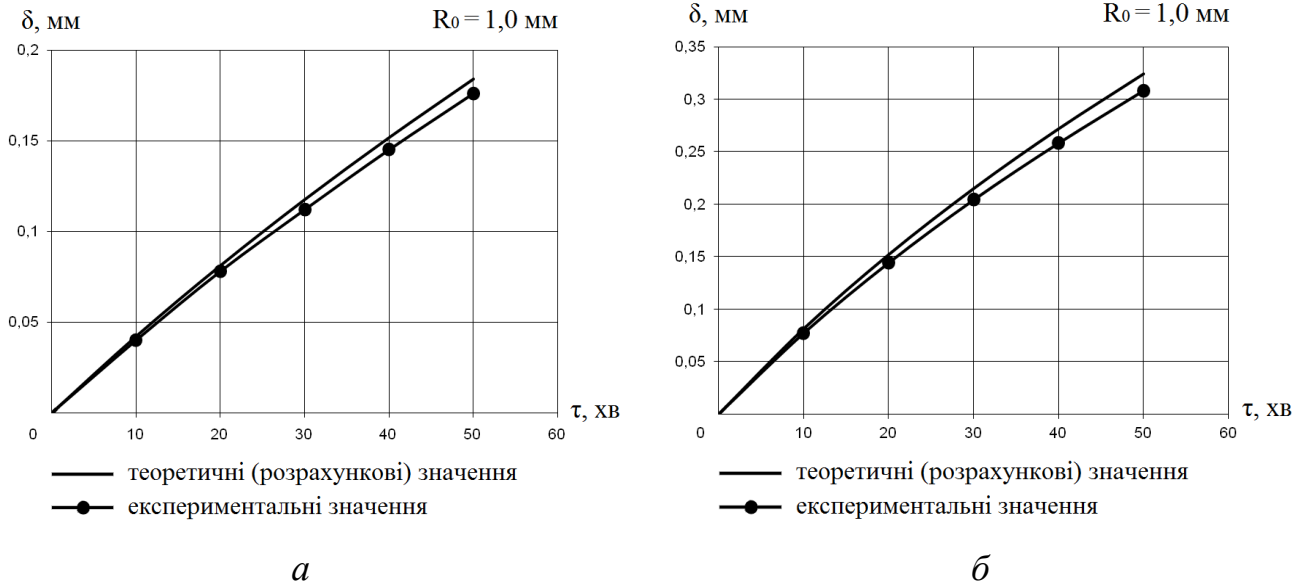


Рисунок 12 – Порівняння теоретичних та експериментальних значень кінетики нарощування органічної оболонки при: *a* – $g_0 = 1,86 \cdot 10^{-4} \text{ кг}/(\text{кг} \cdot \text{с})$; *б* – $g_0 = 3,72 \cdot 10^{-4} \text{ кг}/(\text{кг} \cdot \text{с})$

Диференціюючи рівняння (15), отримуємо рівняння для визначення швидкості росту часток в псевдозрідженому шарі:

$$v = \frac{d\delta}{d\tau} = \frac{k \cdot R_0 \cdot g_0 \cdot \rho_{ГР}}{3 \cdot \rho_{ОБ} \cdot \sqrt[3]{\left(g_0 \cdot \frac{\rho_{ГР}}{\rho_{ОБ}} \cdot \tau + 1\right)^2}} \quad (16)$$

Із рисунка 13 видно, що оптимальний час нанесення органічної оболонки має обмежуватись 30-40 хвилинами. Більший час капсулювання при незмінній витраті суспензії призводить до значно вищих енергетичних затрат на одиницю готових гранул.

Причому, зі збільшенням питомої витрати суспензії зменшується оптимальний час проведення процесу.

У киплячому шарі виокремимо елементарний об'єм ΔV , в якому частина гранул приходить із сусідніх елементарних комірок, а деякі гранули залишають цей об'єм. Характеристикою цього є функція ймовірності виходу частинок з виділеного об'єму θ_i . Із усієї сукупності гранул в нижню комірку перейдуть частинки, розмір яких є більшим за деякий критичний, а ті гранули, розмір яких менше критичного, будуть продовжувати укрупнюватись в цьому шарі або перейдуть у вищезташовані комірки за рахунок їх винесення газовим потоком.

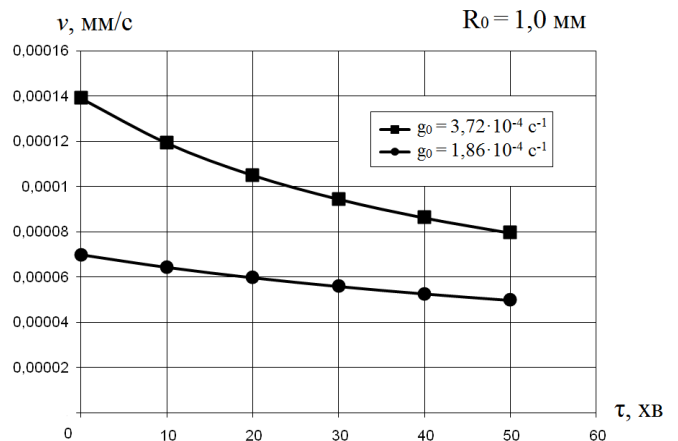


Рисунок 13 – Зміна швидкості росту частинок в псевдозрідженому шарі

Якщо процес переносу матеріальних потоків розглядати в умовах, які безперервно змінюються у часі та просторі, то рівняння матеріального балансу в виділеному елементарному об'ємі запишеться у наступному вигляді:

$$\frac{\partial M_i(\tau)}{\partial \tau} \int_0^{\infty} f(R) dR = M_{i-1}(\tau) \int_0^{\infty} f(R) dR - M_{i+1}(\tau) \cdot \theta_i \int_0^{\infty} f(R) dR. \quad (17)$$

Експериментально встановлено, що суспензія розподіляється пропорційно площі поверхні частинок, тобто швидкість росту гранул в псевдозрідженому шарі не залежить від їх геометричного розміру: $dv/dR=0$. Нехтуємо зміною гранульованого складу за рахунок конвективного переносу і унесення дрібних гранул за рахунок подрібнення та стирання. Перетворенням Лапласа отримуємо:

$$R = R_0 + v \cdot [\ln f_K(R) - \ln f_H(R)] \cdot \tau. \quad (18)$$

Перенесення тепла в об'ємі ΔV за напрямом « x » здійснюється за рахунок:

- 1) тепла, яке надходить в об'єм з частинками із сусідніх комірок;
- 2) тепла, яке покидає елементарний об'єм з гранулами;
- 3) тепла від сушильного агента, що підводиться до поверхні твердих частинок за рахунок конвекції;
- 4) тепла, що покидає об'єм з дрібними частинками, які виносяться газовим потоком в напрямку « y ».

Вважаємо, що у зваженому шарі в результаті активного перемішування частинок перенесення тепла за рахунок конвективного переміщення твердих частинок в напрямку « x » не відбувається, а також нехтуємо винесенням частинок газовим потоком. На підставі таких допущень рівняння теплопереносу в потоці твердої фази запишеться у вигляді:

$$G_B \cdot \rho_{ГР} \cdot c_{ГР} \frac{dt}{d\tau} = \frac{\alpha(R, w) \cdot 6 \cdot (1 - \varepsilon) \cdot [t(R) - t_C]}{R}. \quad (19)$$

Розв'язуючи рівняння (19) при початкових ($\tau > \tau_0$, $0 < r < R$, $t(r, r_0) = f(r)$) та граничних умовах 3-го роду, отримуємо рівняння для визначення температури твердих частинок:

$$t_K = t_{II} \cdot \exp\left(\frac{\alpha(R, w) \cdot 6 \cdot (1 - \varepsilon)}{G_B \cdot \rho_{ГР} \cdot c_{ГР} \cdot R}\right) \cdot \tau_{III}. \quad (20)$$

Тривалість прогріву частинки до заданої температури початку випаровування вологи з плівки суспензії на поверхні гранули:

$$\tau_{III} = \frac{R^2}{a_{ГР} \cdot \left(\frac{Bi^2}{0,47(Bi) + 0,01} - Bi^2 + Bi\right)} \ln \left[\frac{0,47(Bi) + 0,01}{1 - \frac{t_{ВМП} - t_{III}}{t_C - t_{III}}} \right]. \quad (21)$$

У п'ятому розділі проведені тестові дослідження, спрямовані на визначення ефективності використання отриманого продукту.

Нанесена на поверхню мінеральних гранул однокомпонентна товста оболонка у вигляді сухого курячого посліду модифікує їх у продукт з новими фізико-хімічними

властивостями: створюється додатковий опір масоперенесенню в процесі розчинення добрив, і, як результат, мінімізуються непродуктивні втрати елементів живлення. Отже, отримане таким чином органо-мінеральне добриво має пролонговану дію і більш продуктивно живить рослину протягом тривалого часу.

Термін дії капсульованих добрив визначається часом вивільнення цільових компонентів з-під захисної оболонки. Таким чином, в залежності від часу повного вивільнення корисних речовин, капсульовані мінеральні добрива виготовляються в трьох варіантах: з терміном дії 3-4, 5-6, 12-14 місяців.

При розробці та виготовленні повільнодіючих мінеральних добрив необхідно враховувати критерії оцінювання їх ефективності. Згідно європейських норм, обов'язковими умовами є:

- за 24 години вивільняється не більше ніж 15 % мас. цільового компонента;
- за 28 днів вивільняється не більше ніж 75 % мас. цільового компонента;
- за повний термін вивільняється не менше ніж 75 % мас. цільового компонента.

Для визначення та подальшого прогнозування властивостей отриманих органо-мінеральних добрив на спеціально створеній установці (рисунок 14) були проведені експериментальні дослідження вивільнення активного компонента з-під захисної оболонки.

Кількість цільового компонента, який вивільнився впродовж i часу розчинення визначалась за наступним рівнянням:

$$x_i = \frac{C_i}{C_\Sigma} \cdot 100. \quad (22)$$

Нанесена на поверхню гранул оболонка також повинна забезпечувати достатню міцність продукту, щоб попередити його руйнування під час внесення та транспортування.

Задля цього було визначено дійсну величину статичної міцності гранул. Отримані результати порівнювались зі стандартизованими значеннями для карбаміду за ГОСТ 2081-2010 (таблиця 3).

Метод знаходження дійсної величини статичної міцності гранул полягає у визначенні граничної сили, необхідної для руйнування гранул випробуваної фракції при одновісному стискуванні між двома паралельними площинами. Усі гранули послідовно руйнували на лабораторному пристрої (рисунок 15) і за шкалою вимірювали критичне значення сили.

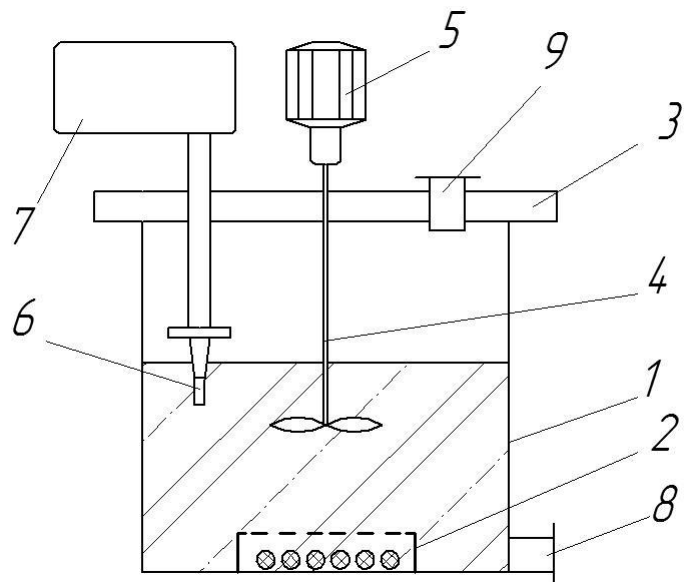


Рисунок 14 – Лабораторна установка для дослідження динаміки вивільнення цільового компонента: 1 – прозора ємність; 2 – перфорована ємність для гранул; 3 – кришка; 4 – лопатева мішалка; 5 – двигун; 6 – електрод кондуктометра; 7 – перетворювач кондуктометра; 8 – патрубок для зливу рідини; 9 – патрубок для наливання рідини

Таблиця 3 – Статична міцність гранул карбаміду

Показник	Вищий сорт	1-ий сорт	2-ий сорт	Роздрібна торгівля
Статична міцність гранул, МПа ($\text{кг}/\text{см}^2$), не менше	1,4 (14)	1,2 (12)	1,2 (12)	–

Статичну міцність гранул X обчислювали за формулою:

$$X = \frac{\sum_{i=1}^{i=20} P_i}{20 \cdot S_1} = \frac{\sum_{i=1}^{i=20} P_i}{20 \cdot \frac{\pi \cdot D_{\text{СЕР}}^2}{4}} \quad (23)$$

Результати тестових досліджень гранул карбаміду, покритих курячим послідом, наведені на рисунках 16 і 17.

Аналіз рисунка 17 показує, що нанесене на гранули карбаміду покриття у вигляді сухого курячого посліду збільшує її статичну міцність. Відтак, при товщині органічної оболонки 35 % мас. статична міцність гранули зростає удвічі (2,75 МПа), а при 50 % мас. – майже втричі (4,1 МПа).

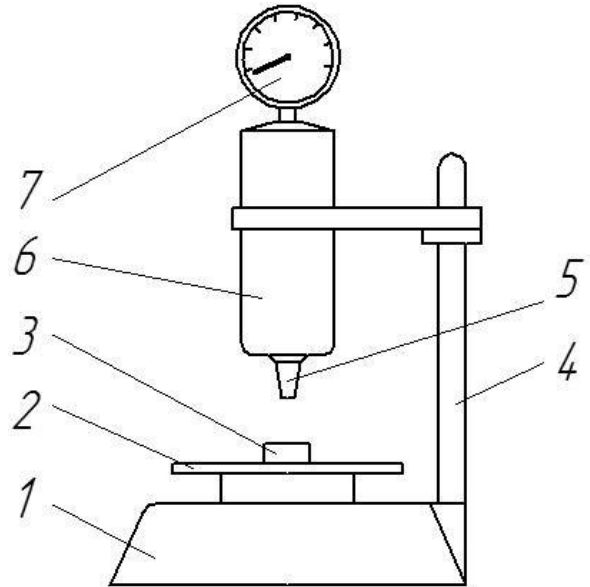


Рисунок 15 – Схема приладу для визначення статичної міцності гранул: 1 – опорна плита; 2 – обертова площадка; 3 – переходник; 4 – рама; 5 – щуп; 6 – корпус; 7 – вимірвальна шкала

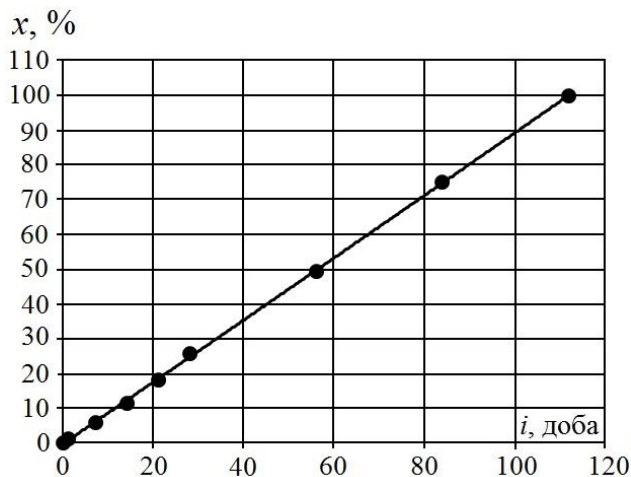


Рисунок 16 – Зміна кількості розчиненого цільового компонента в часі (середа розчинення – вода)

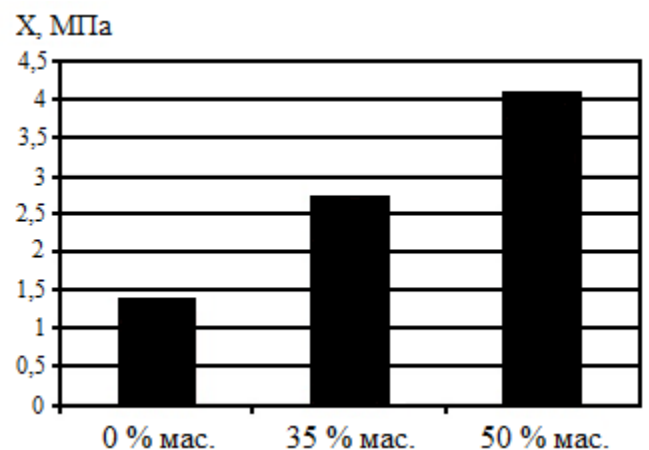


Рисунок 17 – Статична міцність гранул при відповідній частці органічної оболонки

За результатами теоретичних та експериментальних досліджень розроблено схему установки для капсулювання мінеральних добрив, яка враховує фізико-хімічні особливості використовуваних речовин. На рисунку 18 зображено структурну схему блоку покриття гранул мінеральних добрив суспензією курячого посліду.

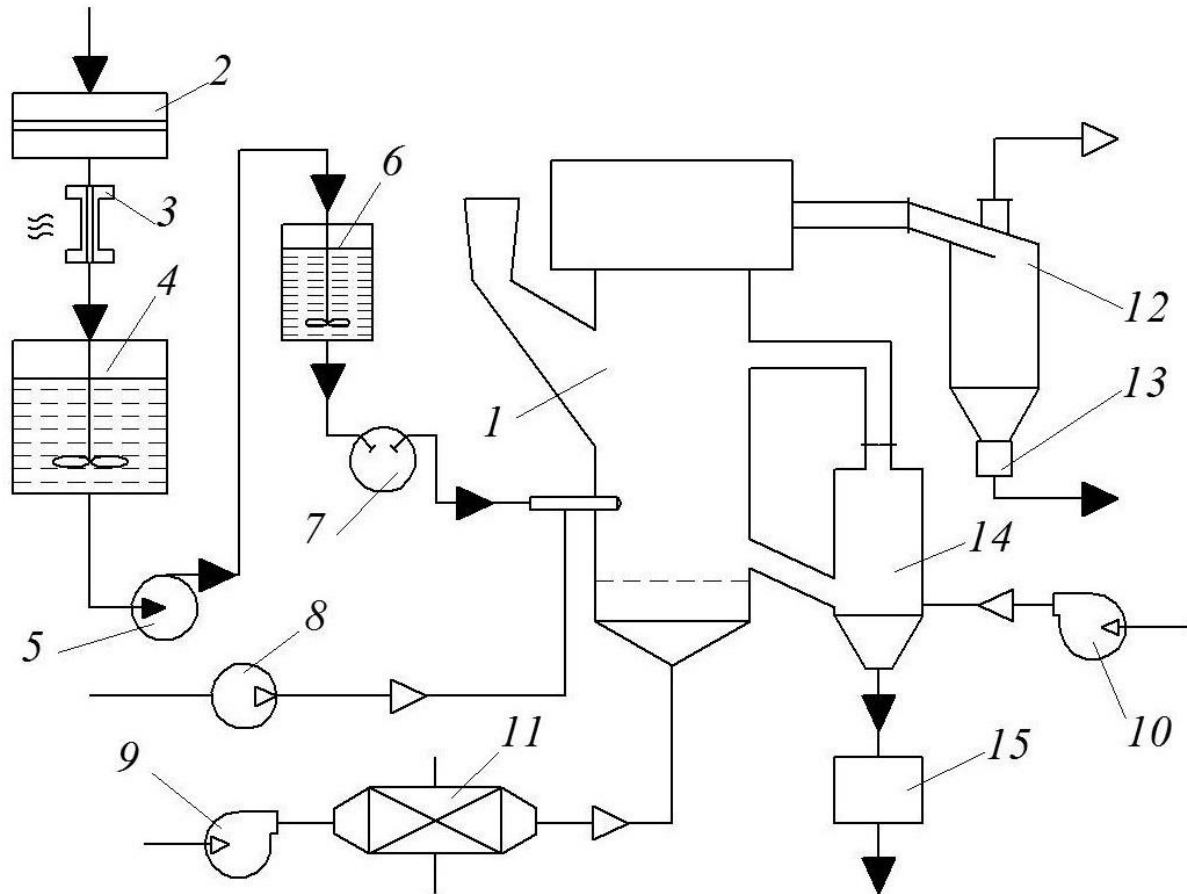


Рисунок 18 – Структурна схема блоку покриття гранул мінеральних добрив суспензією курячого посліду: 1 – апарат киплячого шару; 2 – дисковий млин; 3 – кавітатор; 4 – ємність робочої речовини; 5 – насос; 6 – мірний бачок; 7 – насос-дозатор; 8 – компресор; 9, 10 – газодувка; 11 – калорифер; 12 – циклон; 13 – збірник пилу; 14 – сепаратор; 15 – збірник гранул

Послід птахів у великій кількості містить патогенну та умовно-патогенну мікрофлору та яйця гельмінтів. Крім того, необроблений послід може бути фактором передачі понад 100 інфекційних і паразитарних захворювань (бруцельоз, туберкульоз тощо). Саме тому пташиний послід віднесений до III класу небезпеки, і перш ніж його використовувати в якості добрива, він повинен пройти стадію підготовки (переробки).

У вищенаведеній схемі (рисунок 18), переробка курячого посліду передбачає його сушку та грануляцію. Термічна обробка дозволяє уникнути перерахованих вище недоліків. Однак, при робочих температурах (60-65°C) процесу капсулювання у курячому посліді повністю не вдається знищити патогенну флору.

Для вирішення цього питання пропонується використовувати принципово новий перетворювач енергії електромагнітних полів. Таким чином, пропонується удосконалення потокової схеми капсулювання мінеральних гранул (рисунок 18) за рахунок оснащення її кавітатором 3 (рисунок 19).

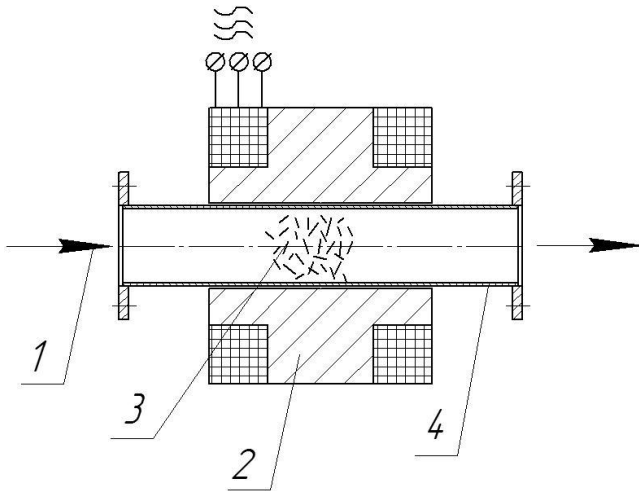


Рисунок 19 – Принципова схема пристрою з обертовим електромагнітним полем: 1 – потік оброблювальної речовини; 2 – електромагнітний індуктор; 3 – феромагнітні голки; 4 – робоча зона апарата

Утворені процеси призводять до незворотних біохімічних процесів у мікроорганізмах на клітинному рівні. Тобто на виході маємо гомогенізовану суспензію курячого посліду без бактерій та яєць паразитів, і навіть без насіння бур'янів.

У результаті впровадження вищенаведеного процесу можна буде отримувати знезаражену та гомогенізовану сировину, повністю підготовлену для роботи, яка не завдасть шкоди ані людині, ані ґрунту.

ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі представлено вирішення важливої науково-технічної задачі – покриття гранул мінеральних добрив органічною суспензією, що підвищує коефіцієнт використання добрив, мінімізує їх кількісне внесення, а завдяки органічному походженню оболонки не забруднює довкілля та забезпечує бездефіцитний баланс гумусу в ґрунті.

1. Запропоновано в якості органічної суспензії використовувати рідкий курячий послід (Патент 73107 UA МПК C05G 5/00).
2. Експериментально встановлено температурні режими процесу покриття гранул карбаміду суспензією курячого посліду, визначено оптимальний (робочий) режим, а саме: при температурі в шарі гранул 60-65 °С на поверхні мінеральної частинки утворюється суцільний міцний шар сухої органіки, який сприяє повному залученню мінеральних ядер.

3. Отримано рівняння для прогнозування зміни гідравлічного опору киплячого шару дисперсного матеріалу (карбаміду) в умовах його зрошення органічною суспензією (рідким курячим послідом).
4. Експериментально і теоретично досліджено кінетику укрупнення мінеральних гранул при їх капсулюванні суспензією курячого посліду та отримано емпіричне рівняння, яке дає змогу спрогнозувати змінення середньозваженого діаметра полідисперсних гранул протягом процесу капсулювання.
5. Отримано критеріальне рівняння для визначення коефіцієнту тепловіддачі від теплового агента до поверхні частинок під час випаровування суспензії курячого посліду.
6. Розроблено математичну модель процесу покриття гранул мінеральних добрив органічною суспензією, яка враховує зміну щільності розподілу гранул за розміром.
7. Запропоновано технологічну схему установки безперервної дії для покриття гранул мінеральних добрив суспензією курячого посліду, яка враховує специфічні властивості матеріалу оболонки.
8. На підставі проведених тестових досліджень ефективності використання органо-мінеральних добрив доведена перспективність використання сухого курячого посліду в якості захисної оболонки, яка забезпечує дозоване вивільнення корисних речовин та підвищує статичну міцність гранули.

Основні умовні позначення

a – коефіцієнт температуропровідності, $\text{м}^2/\text{с}$; $c_{\text{ГР}}$ – теплоємність твердої частинки, $\text{Дж}/(\text{кг}\cdot\text{К})$; $c_{\text{П}}$ – теплоємність повітря, $\text{Дж}/(\text{кг}\cdot\text{К})$; $c_{\text{С}}$ – теплоємність суспензії, $\text{Дж}/(\text{кг}\cdot\text{К})$; C_i – поточна концентрація цільового компонента у воді, $\text{кг}/\text{м}^3$; C_{Σ} – максимально можлива концентрація цільового компонента у воді, $\text{кг}/\text{м}^3$; D_0 – початковий діаметр гранул, мм ; D – поточний діаметр гранул, мм ; $D_{\text{СЕР}}$ – середньозважений діаметр гранул, мм ; F – поверхня теплообміну, м^2 ; G_0 – масова витрата матеріалу оболонки, $\text{кг}/\text{с}$; $G_{\text{В}}$ – витратна концентрація зваженого шару, $\text{кг}/\text{кг}$; $G_{\text{вунс}}$ – масова витрата вологи, що випаровується, $\text{кг}/\text{с}$; $G_{\text{П}}$ – масова витрата повітря, $\text{кг}/\text{с}$; $G_{\text{С}}$ – масова витрата суспензії, $\text{кг}/\text{с}$; g_0 – питома витрата матеріалу оболонки (віднесена до маси вихідних гранул), $\text{кг}/(\text{кг}\cdot\text{с})$; $g_{\text{ПІТ}}$ – питома витрата зріджуючого повітря, $\text{кг}/(\text{с}\cdot\text{м}^2)$; $l_{\text{ПІТ}}$ – питома витрата органічної суспензії, $\text{кг}/(\text{с}\cdot\text{м}^2)$; M_i, M_{i-1}, M_{i+1} – маса гранул у відповідному елементарному об'ємі шару, кг ; $f(D, \tau)$ – функція розподілу гранул за розмірами; $M_{\text{Ш}}$ – поточна маса шару гранул, кг ; $M_{\text{Ш}}^{\text{II}}$ – маса шару вихідних гранул, кг ; n – кількість частинок в шарі, шт ; P_i – сила, яка необхідна для руйнування однієї гранули, Н ; Q – кількість теплоти, Вт ; R_0 – початковий радіус частинки, мм ; R – поточний радіус частинки, мм ; $R_{\text{К}}$ – кінцевий радіус частинки, мм ; r – питома теплота випаровування суспензії, $\text{Дж}/\text{кг}$; S_1 – площа поперечного перерізу гранули, см^2 ; $t_{\text{Н}}$ – температура навколишнього

середовища, $^{\circ}\text{C}$; $t_{П1}$ – температура повітря під газорозподільною решіткою, $^{\circ}\text{C}$; $t_{П2}$ – температура повітря на виході з робочої зони апарата, $^{\circ}\text{C}$; t_c – температура суспензії на поверхні частинок, $^{\circ}\text{C}$; t_{c0} – початкова температура суспензії, $^{\circ}\text{C}$; t_T – температура поверхні твердих частинок, $^{\circ}\text{C}$; v – швидкість росту частинок, $\text{мм}/\text{с}$; w – швидкість повітря, $\text{м}/\text{с}$; X – статична міцність гранул, МПа ; x_i – кількість цільового компонента, який вивільнився впродовж i часу розчинення, $\%$; $x_{\text{мвс}}$ – масова доля сухої речовини в суспензії; α – коефіцієнт тепловіддачі, $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$; $\Delta P_{Ш}$ – гідравлічний опір шару гранул, Па ; ΔP_{Σ} – сумарний опір шару матеріалу, зрошеного суспензією, та газорозподільної решітки, Па ; ΔP_C – гідравлічний опір сухої газорозподільної решітки, Па ; δ – поточна товщина органічної оболонки, мм ; δ_K – кінцева товщина органічної оболонки, мм ; λ – коефіцієнт теплопровідності повітря, $\text{Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$; ν – кінематичний коефіцієнт в'язкості повітря, $\text{м}^2/\text{с}$; $\rho_{ГР}$ – щільність вихідних гранул, $\text{кг}/\text{м}^3$; $\rho_{ОБ}$ – щільність матеріалу оболонки, $\text{кг}/\text{м}^3$; τ – час, с ; ψ – коефіцієнт, що залежить від часу. **Безрозмірні комплекси:** $Nu = (\alpha \cdot D) / \lambda$ – критерій Нусельта; $Pr = \nu / a$ – критерій Прандтля; $Re = (w \cdot D) / \nu$ – критерій Рейнольдса; $Bi = (\alpha \cdot R) / \lambda_T$ – критерій Біо

Список опублікованих праць за темою дисертації

1. Острога Р.О. Гранульовані органо-мінеральні добрива пролонгованої дії / Р.О. Острога, С.І. Якушко, Є.С. Співак // Хімічна промисловість України. – 2012. – № 3 (110). – С. 73-76. *Особистий внесок: доведено перевагу використання капсульованих мінеральних добрив, запропоновано технологічну схему створення гранульованого карбаміду пролонгованої дії.*
2. Острога Р.А. Органические и органо-минеральные удобрения / Р.А. Острога, С.И. Якушко // Наукові праці ОНАХТ. Серія: Технічні науки. – 2012. – Т. 2, вип. 41. – С. 242-246. *Особистий внесок: розроблено технологію виготовлення гранульованого добрива на органічній основі, встановлено механізм утворення органо-мінеральних гранул пролонгованої дії.*
3. Острога Р.О. Режимні параметри процесу капсулювання мінеральних добрив органічною оболонкою / Р.О. Острога, М.П. Юхименко // Вісник Сумського державного університету. Серія: Технічні науки. – 2013. – № 1. – С. 56-60. *Особистий внесок: розробка фізичної моделі нанесення органічної оболонки на гранули мінеральних добрив.*
4. Острога Р.О. Кінетика росту гранул при їх капсулюванні у псевдозрідженому шарі / Р.О. Острога, М.П. Юхименко // Acta Universitatis Pontica Euxinus. – 2013. – Special number. – P. 99-101. *Особистий внесок: розробка математичної моделі кінетики процесу капсулювання.*
5. Острога Р.А. Балансовые расчеты процесса капсулирования гранулированных минеральных удобрений / Р.А. Острога, Н.П. Юхименко // Сборник научных трудов SWorld. Серія: Технические науки. – 2013. – Т. 8, вып. 4. – С. 73-76.

- Особистий внесок: виведено залежність для визначення товщини шару органічної оболонки протягом процесу капсулювання.*
6. Острога Р.О. Кінетика капсулювання гранульованих мінеральних добрив органічною оболонкою / Р.О. Острога // Вісник НТУ ХП. Серія: Нові рішення в сучасних технологіях. – 2014. – № 7 (1050). – С. 146-151. *Особистий внесок: розробка математичної моделі, співставлення теоретичних розрахунків з результатами експериментальних досліджень.*
 7. Острога Р.О. Капсулювання азотовмісних добрив суспензією курячого посліду в апараті киплячого шару / Р.О. Острога, М.П. Юхименко // Східно-Європейський журнал передових технологій. Серія: Технології органічних і неорганічних речовин. – 2014. – № 2/6 (68). – С. 11-15. *Особистий внесок: проведення експериментальних досліджень та їх математична обробка.*
 8. Острога Р.А. Анализ способов сушки и гранулирования органических веществ / Р.А. Острога, С.И. Якушко // Сучасні технології у промисловому виробництві: науково-технічна конференція викладачів, співробітників, аспірантів і студентів факультету ТеСЕТ, м. Суми, 18 – 22 квітня 2011 р.: тези доповідей. – Суми: СумДУ, 2011. – Ч. 1. – С. 110-111. *Особистий внесок: проведено критичний аналіз апаратного оформлення процесу капсулювання.*
 9. Острога Р.О. Отримання гранульованого орґано-мінерального добрива пролонгованої дії / Р.О. Острога, С.І. Якушко // Сучасні технології у промисловому виробництві: II Всеукраїнська міжвузівська науково-технічна конференція, м. Суми, 17 – 20 квітня 2012 р.: тези доповідей. – Суми: СумДУ, 2012. – Ч. 2. – С. 150-151. *Особистий внесок: розроблено технологію безперервного процесу покриття гранул мінеральних добрив суспензією курячого посліду.*
 10. Острога Р.А. Биологизация агропромышленного комплекса / Р.А. Острога // Актуальные проблемы науки и образования в области естественных и сельскохозяйственных наук: Международная научно-практическая конференция, г. Петропавловск (Казахстан), 27 апреля 2012 г.: тезисы докладов. – Петропавловск: СКГУ им. М. Козыбаева, 2012. – Т. 1. – С. 78-79. *Особистий внесок: доведено ефективність використання добрив пролонгованої дії на органічній основі.*
 11. Острога Р.А. Капсулирование гранул минеральных удобрений как способ утилизации органических отходов / Р.А. Острога, Н.П. Юхименко // Хімічна технологія: наука та виробництво: I Міжнародна науково-технічна конференція, м. Шостка, 07 – 09 листопада 2012 р.: тези доповідей. – Суми: СумДУ, 2012. – С. 47. *Особистий внесок: обґрунтовано доцільність використання в якості матеріалу капсульної оболонки для мінеральних добрив органічних відходів тваринництва.*
 12. Острога Р.О. Температурні режими процесу капсулювання мінеральних добрив органічною оболонкою / Р.О. Острога, М.П. Юхименко // Сучасні технології у промисловому виробництві: науково-технічна конференція викладачів, співробітників, аспірантів і студентів факультету ТеСЕТ, м. Суми, 23 – 26 квітня 2013 р.: тези доповідей. – Суми: СумДУ, 2013. – Ч. 2. – С. 142. *Особистий*

внесок: проведення експериментальних досліджень, аналіз отриманих результатів.

13. Ostroha R. Mechanism of film formation during granules capsulation in fluidized bed / R. Ostroha, M. Yukhymenko // Chemistry and Chemical Technology: III International Conference of Young Scientists CCT-2013, Lviv, November 21 – 23, 2013. – Lviv Polytechnic Publishing House, 2013. – P. 148-149. *Особистий внесок: розробка математичної моделі процесу капсулювання.*
14. Острога Р.О. Особливості процесу капсулювання мінеральних добрив органічною оболонкою / Р.О. Острога, М.П. Юхименко // Сучасні технології у промисловому виробництві: III Всеукраїнська міжвузівська науково-технічна конференція, м. Суми, 22 – 25 квітня 2014 р.: тези доповідей. – Суми: СумДУ, 2014. – Ч. 2. – С. 90. *Особистий внесок: проведення експериментальних досліджень, аналіз отриманих результатів.*
15. Пат. 73107 Україна, МПК (2012.01) C05G 5/00. Гранульоване органо-мінеральне добриво / С.І. Якушко, Р.О. Острога, Є.С. Співак; заявник і власник Сумський державний університет. – № у 2012 02645; заявл. 05.03.2012; опубл. 10.09.2012, Бюл. № 17. *Особистий внесок: ідея винаходу, підготовка матеріалів для подачі заявки.*

АНОТАЦІЯ

Острога Р.О. Процес покриття гранул мінеральних добрив органічною суспензією. – На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.17.08 – процеси та обладнання хімічної технології. – Сумський державний університет МОН України, Суми, 2014.

Дисертаційну роботу присвячено теоретичним та експериментальним дослідженням процесу покриття гранул мінеральних добрив органічною суспензією у вигляді рідкого курячого посліду. Експериментально встановлені температурні режими процесу та виявлено робочий режим. Досліджено кінетику укрупнення гранул та отримано емпіричне рівняння, яке дає змогу спрогнозувати змінення середньозваженого діаметра частинок протягом процесу капсулювання. Запропоновано рівняння у вигляді безрозмірних величин для розрахунку гідравлічного опору дисперсного шару матеріалу в залежності від швидкості зріджуючого повітря та інтенсивності подачі суспензії. Отримано критеріальне рівняння для визначення коефіцієнту тепловіддачі від теплового агента до поверхні частинок під час випаровування органічної суспензії.

Теоретичні розрахунки були підтверджені результатами експериментальних досліджень, тобто розроблена математична модель може бути застосована для розрахунку процесу покриття мінеральних гранул органічною суспензією в псевдозрідженому шарі. Розроблено методику розрахунку процесу та запропоновано технологічну схему установки покриття гранул мінеральних добрив суспензією органіки. Проведено тестові дослідження ефективності використання двокомпонентних органо-мінеральних гранул. Основні результати дисертаційної роботи передані для впровадження у виробництво.

Ключові слова: капсулювання, псевдозрідження, мінеральна гранула, органічна суспензія, карбамід, курячий послід, температурний режим, гідродинаміка, теплообмін, кінетика росту.

АННОТАЦИЯ

Острога Р.А. Процесс покрытия гранул минеральных удобрений органической суспензией. – На правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.17.08 – процессы и оборудование химической технологии. – Сумский государственный университет МОН Украины, Сумы, 2014.

Диссертационная работа посвящена теоретическим и экспериментальным исследованиям процесса покрытия гранул минеральных удобрений органической суспензией в виде жидкого куриного помета. Экспериментально установлены температурные режимы процесса и выявлен рабочий режим. Исследована кинетика укрупнения гранул и получено эмпирическое уравнение, позволяющее спрогнозировать изменение средневзвешенного диаметра частиц в течение процесса капсулирования. Предложено уравнение в виде безразмерных величин для расчета гидравлического сопротивления дисперсного слоя материала в зависимости от скорости оживающего воздуха и интенсивности подачи суспензии. Получены критериальные уравнения для определения коэффициента теплоотдачи от теплового агента к поверхности частиц при испарении органической суспензии.

Теоретические расчеты были подтверждены результатами экспериментальных исследований, т.е. разработанная математическая модель может быть применена для расчета процесса покрытия минеральных гранул органической суспензией в псевдооживленном слое. Разработана методика расчета процесса и предложена технологическая схема установки покрытия гранул минеральных удобрений суспензией органики. Проведены тестовые исследования эффективности использования двухкомпонентных органо-минеральных гранул. Основные результаты диссертационной работы переданы для внедрения в производство.

Ключевые слова: капсулирование, псевдооживление, минеральная гранула, органическая суспензия, карбамид, куриный помет, температурный режим, гидродинамика, теплообмен, кинетика роста.

ANNOTATION

Ostroha R.O. Process of mineral fertilizer granules covering with organic suspension. – Manuscript copyright.

Ph. D. thesis in Technical Science in speciality 05.17.08 – processes and equipment of chemical technology. – Sumy State University MSE of Ukraine, Sumy, 2014.

Thesis work is devoted to theoretical and experimental researches of process of mineral fertilizer granules covering with organic suspension in the form of liquid poultry manure. Characteristic temperature regimes of application of poultry manure suspension on mineral fertilizer granules were experimentally indicated, that were 40-50°C, 60-65°C,

70-80°C. Working temperature range was detected (60-65°C), when solid competent layer of dry poultry manure was formed on particle surface, that promoted complete organic encapsulation of mineral granules.

Particles aggregation kinetics in fluidized bed was investigated. Thereby it was found that granules enlargement by organic substance with working conditions was characterized by proportional and surface (normal) growth – without formation of new granulation organic centers. It allowed to enlarge all granules to market size (4-5 mm). Empiric equation was obtained, which allowed to forecast changes of weighted average diameter of particles during encapsulation process.

Equation in the form of dimensionless values for hydraulic resistance calculation of material disperse layer depending on air speed and suspension productivity was got on the basis of general experimental data. Criteria equations for determination of heat-conduction coefficient from heat agent to particles surface during organic suspension evaporation were got.

Mathematic model of process of mineral fertilizer granules covering with organic suspension was developed, which took into account changes of granules division density by size. Theoretic calculations were confirmed by results of experimental researches (inaccuracy did not exceed 10%); it means that this mathematic model can be used for calculation of investigated process. Engineering analysis methods of encapsulation process were developed on the basis of received theoretical dependencies.

Technological scheme of installation of mineral fertilizer granules covering with poultry manure suspension equipped with cavitator was proposed. As a result of cavitation process use it will be possible to get disinfected and homogenized raw material, completely prepared for work, which will not do harm to both human and soil.

On the basis of conducted test investigations it was found, that organic cover, applied on mineral granules surface in amount of 50% wt increased their static durability practically threefold, and the most important fact was that received product could be used as fertilizer of prolonged effect with nutrient substances release period 3-4 months.

Basic results of thesis work were transferred to manufacture for their use during development of initial data for projecting and technical and commercial propositions.

Keywords: *encapsulation, fluidization, mineral granule, organic suspension, carbamide, poultry manure, temperature regime, hydrodynamics, heat exchange, growth kinetics.*