

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
СУМСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ**

На правах рукопису

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

Дисертація на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Науковий керівник:
кандидат технічних наук, доцент
Юхименко Микола Петрович

СУМИ – 2014

ЗМІСТ

ВСТУП	5
1. АНАЛІЗ ЛІТЕРАТУРНИХ ДЖЕРЕЛ ІЗ ЗАКОНОМІРНОСТЕЙ ГРАНУЛЮВАННЯ ТА КАПСУЛЮВАННЯ	10
1.1 Основні проблеми у застосуванні гранульованих мінеральних добрив та їх капсулювання як спосіб покращення фізико-хімічних властивостей.....	10
1.1.1 Сучасний стан та перспективи використання мінеральних добрив.....	10
1.1.2 Загальна характеристика мінеральних добрив.....	12
1.1.3 Мета та методи капсулювання гранульованих мінеральних добрив. Види капсульованих гранул.....	15
1.2 Вибір матеріалу захисної оболонки.....	19
1.3 Обладнання для нанесення захисних оболонок на гранули мінеральних добрив.....	21
1.4 Теплообмін процесу капсулювання у киплячому шарі.....	28
1.5 Теоретичні основи кінетики росту гранул у киплячому шарі....	31
Висновки до першого розділу.....	37
2. ХАРАКТЕРИСТИКА ОБ'ЄКТІВ ДОСЛІДЖЕННЯ ТА МЕТОДИКИ ПРОВЕДЕННЯ ЕКСПЕРИМЕНТІВ	39
2.1 Характеристика карбаміду.....	39
2.2 Характеристика курячого посліду.....	40
2.3 Експериментальна установка для капсулювання мінеральних добрив.....	41
2.4 Методики дослідження гідравлічних закономірностей, теплообміну та кінетики росту частинок під час капсулювання гранул.....	45
2.5 Методика дослідження структури гранул.....	49
2.6 Методика дослідження проникності оболонки.....	50

2.7	Методика визначення статичної міцності гранул.....	52
2.8	Оцінка похибок вимірювання.....	53
	Висновки до другого розділу.....	55
3.	ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ	
	ПОКРИТТЯ МІНЕРАЛЬНИХ ГРАНУЛ ОРГАНІЧНОЮ	
	СУСПЕНЗІЄЮ.....	57
3.1	Фізична модель процесу покриття гранул мінеральних добрив органічною суспензією.....	57
3.2	Режимні параметри нанесення суспензії курячого посліду на гранули мінеральних добрив.....	59
3.3	Експериментальне дослідження гідравлічних закономірностей процесу капсулювання. Узагальнення результатів.....	62
3.4	Експериментальне дослідження кінетики росту гранул у киплячому шарі. Узагальнення результатів.....	66
3.5	Експериментальне дослідження теплообміну процесу капсулювання. Узагальнення результатів.....	76
	Висновки до третього розділу.....	80
4.	МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ПРОЦЕСУ КАПСУЛЮВАННЯ	
	ГРАНУЛ МІНЕРАЛЬНИХ ДОБРИВ ОРГАНІЧНОЮ	
	ОБОЛОНКОЮ.....	81
4.1	Закономірності розподілу матеріальних потоків та кінетики процесу капсулювання в апараті киплячого шару.....	81
4.2	Закономірності розподілення потоків твердої фази в процесі капсулювання у киплячому шарі.....	89
4.3	Закономірності теплопереносу з потоками твердої фази у шарі матеріалу.....	93
4.4	Закономірності розподілення температур в середині гранул при їх прогріві.....	96
4.5	Методика розрахунку процесу покриття гранул мінеральних добрив органічною суспензією.....	99

Висновки до четвертого розділу.....	106
5. ДОСЛІДЖЕННЯ ОСНОВНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ ГРАНУЛ КАРБАМІДУ ПОКРИТИХ КУРЯЧИМ ПОСЛІДОМ.....	107
5.1 Експериментальні дослідження статичної міцності гранул.....	107
5.2 Експериментальні дослідження проникності органічної оболонки.....	108
5.3 Установка для покриття гранул мінеральних добрив органічною суспензією.....	110
Висновки до п'ятого розділу.....	114
ВИСНОВКИ.....	116
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	118
ДОДАТКИ.....	131

ВСТУП

Актуальність теми. 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 вимиваємість 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 високоефективних 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 органо-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.

РОЗДІЛ 1

АНАЛІЗ ЛІТЕРАТУРНИХ ДЖЕРЕЛ ІЗ ЗАКОНОМІРНОСТЕЙ ГРАНУЛЮВАННЯ ТА КАПСУЛЮВАННЯ

1.1 Основні проблеми у застосуванні гранульованих мінеральних добрив та їх капсулювання як спосіб покращення фізико-хімічних властивостей

1.1.1 Сучасний стан та перспективи використання мінеральних добрив

Сучасне сільськогосподарське виробництво неможливо представити без застосування добрив, бо саме вони є джерелом різних поживних елементів для рослин (особливо азоту, фосфору і калію) і покращання властивостей ґрунту [1-7]. Використання добрив – це один з основних прийомів інтенсивного землеробства, що дозволяє значно підвищити врожаї будь-яких культур на вже освоєних площах без додаткових витрат на обробку нових земель. Навіть коли ґрунт дуже родючий і здатний повністю задовольнити потреби рослин у поживних речовинах, слід все ж вносити добрива для того, щоб підтримувати його на належному рівні [4].

Усі використовувані на сьогоднішній день добрива можна класифікувати на органічні та мінеральні. Актуальним стає питання: який же з цих видів кращий? Складність полягає в тому, що немає категорично правильної відповіді. Думки експертів у цій галузі різні і діаметрально протилежні. Одні стверджують, що органіка здатна підвищувати врожайність набагато краще, ніж мінеральні добрива [7-13]. Інші, навпаки, відстоюють точку зору, що мінерали набагато ефективніше засвоюються рослинами і сприятливо позначаються на підвищенні родючості ґрунту [1-3, 5].

На сьогоднішній день дуже широко застосовуються мінеральні добрива – це дуже насичені концентрати, одержувані промисловим шляхом. Причина

їхньої популярності полягає в тому, що вони легко поглинаються рослинами і, як наслідок, дають видимий результат за короткий проміжок часу [1-3]. Однак, абсолютно всі пропоновані мінеральні добрива містять у своєму складі не більше 50% необхідних рослинам хімічних елементів, а інше є баластом, який також всмоктується рослинами [12].

Великою перевагою мінеральних добрив перед органічними є їх традиційна і дуже зручна форма поставки – гранули. Більшість речовин у гранульованому вигляді мають кращі фізико-хімічні показники [14-19]. Гранулювання дозволяє істотно зменшити схильність продукту до злежування, а, отже, спростити зберігання, транспортування та дозування [15].

Також перевагою гранульованих мінеральних добрив є істотно менша їх витрата, у порівнянні з традиційними компостами та біогумусом. Причина полягає в тому, що гранули вносяться «прицільно» – безпосередньо під кореневу систему рослин. Такі добрива можуть застосовуватись як в промислових масштабах, так і в домашньому садівництві [3].

Однак, зростаючі дози мінеральних солей знищують у ґрунті гумус, подрібнюють його структуру, роблять ґрунт щільним, холодним, малодоступним для повітря і вологи, тим самим позбавляючи природної родючості. Така тенденція спостерігається з кожним роком все більше. Вживання навіть ретельно підібраних для культури мінеральних складових не вирішує проблему родючості ґрунту. І якщо органіку можна застосовувати без мінеральних добрив, то мінералізація не підвищить вологоємність і повітропроникність ґрунту [12, 13, 20].

Сучасний стан аграрного сектора потребує біологізації землеробства, оскільки безконтрольне застосування мінеральних добрив та пестицидів призвело до значного погіршення стану ґрунтів і довкілля [8, 13]. Бо саме ґрунт є одним з найбільш уразливих природних об'єктів при інтенсивній господарській діяльності. Він постійно потерпає від фізичних і хімічних (техногенних) навантажень та незбалансованих систем землеробства, і з кожним роком вміст гумусу в ньому стає дедалі нижчим. Ще 100 років тому

середній вміст гумусу в ґрунтах України становив 4,2%, тепер, за даними обстежень, вміст гумусу становить лише 3,2%. Основною причиною втрати гумусу є дефіцит надходження в ґрунт органічної речовини, яка благотворно впливає на його властивості, на водне та повітряне живлення рослин, сприяє розвитку ґрунтових бактерій і мікроорганізмів, які допомагають рослинним культурам отримати доступні поживні елементи. Досягти позитивного балансу гумусу або хоча б призупинити його від'ємний приріст можна щорічним внесенням від 8 до 14 т/га органіки в залежності від місцевості [8].

Таким чином, у зв'язку зі сформованою екологічною обстановкою останнім часом активно пропагується використання добрив, що поєднують в собі дію органічних і мінеральних речовин, але при цьому виключають шкідливі для ґрунту добавки. Саме за цим принципом розробляються такі добрива, які лежать в основі органічного землеробства, повністю безпечного для довкілля та здоров'я людини. Основна тенденція – це обмеження кількості мінеральних добрив і грамотне використання добрив на органічній основі [21]. Оптимальне співвідношення елементів живлення в орґано-мінеральних добривах запобігає надлишковому накопиченню нітратів в продуктах, забезпечує не тільки приріст урожаю, але й поліпшує поживну цінність продукції [22].

1.1.2 Загальна характеристика мінеральних добрив

Мінеральні добрива містять поживні речовини у вигляді мінеральних солей. В залежності від того, які саме поживні речовини входять до їх складу добрива підрозділяються на прості й комплексні (рисунк 1.1).

Прості добрива містять один поживний елемент. Але це визначення є дещо умовним, оскільки крім одного з основних елементів живлення до складу простих добрив також можуть входити: сірка, магній, кальцій, мікроелементи [1-3].

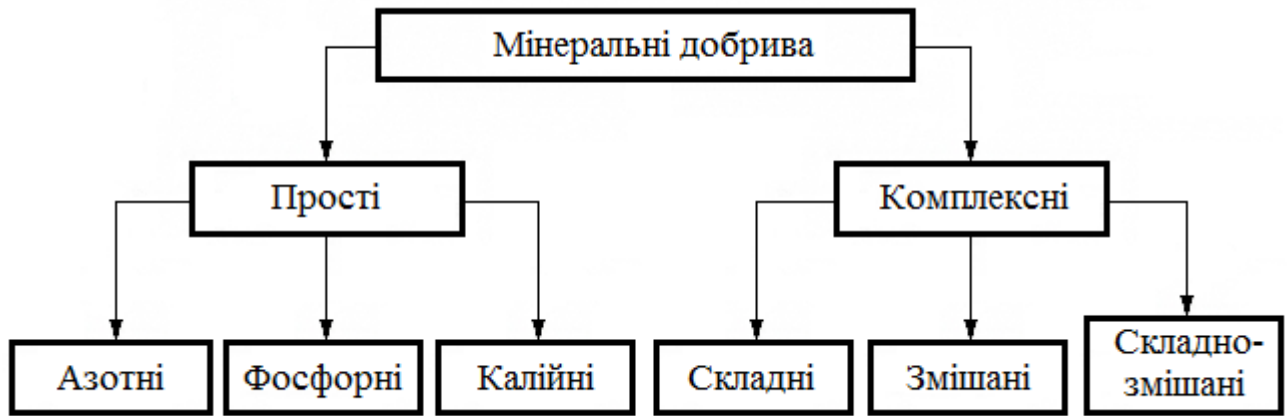


Рисунок 1.1 – Схема класифікації мінеральних добрив

У практиці землеробства найчастіше доводиться зіштовхуватися з нестачею у ґрунті трьох макроелементів – азоту, фосфору і калію. Виходячи з цього, є три основні групи простих мінеральних добрив: азотні, фосфорні та калійні.

Азотні добрива. Азот є одним з основних елементів живлення, які необхідні для життя рослин. Він відіграє важливу роль в обміні речовин. Крім того, азот є найважливішою складовою частиною хлорофілу, без якого не може протікати процес фотосинтезу, а отже не можуть утворюватися найважливіші для харчування людей і тварин органічні речовини. Існують джерела поповнення природних запасів азоту, але вони доставляють лише частину азоту, який виноситься з врожаями сільськогосподарських культур. Тому необхідно вживати заходи для оптимального збільшення родючості [23, 24].

Азотні добрива класифікуються на такі групи [1]:

- нітратні добрива (селітри), які містять азот в нітратній формі;
- амонійні і аміачні добрива (тверді та рідкі), які містять азот в амонійній та аміачній формі відповідно;
- амонійно-нітратні добрива (аміачна селітра);
- добрива, в яких азот знаходиться в амідній формі (карбамід);
- водні розчини карбаміду та аміачної селітри, які отримали назву КАС (карбамід-аміачна селітра).

Фосфорні добрива. Фосфор (точніше його оксид P_2O_5) – відносно поширений у природі елемент. Фосфорні добрива прийнято поділяти на водорозчинні та водонерозчинні (важкорозчинні). Останні, у свою чергу, діляться на розчинні у лимонній кислоті та розчинні у сильних кислотах [2, 3].

Водорозчинні добрива є більш універсальними, завдяки можливості їх використання як на лужному, так і на кислому ґрунті. Їх необов'язково глибоко закладати у ґрунт, а в деяких випадках це навіть шкідливо, оскільки це може призвести до зменшення засвоюваності добрива рослинами. Важкорозчинні добрива застосовують тільки на кислих ґрунтах. Фосфор у подібних добривах засвоюється рослинами лише після впливу на нього кислоти з ґрунтів [25].

Калійні добрива є одними з найнеобхідніших елементів мінерального живлення рослин. У рослинному організмі калій виконує важливі функції. При його недоліку рослини швидше в'януть. Калій позитивно впливає на інтенсивність фотосинтезу, окислювальних процесів і утворення органічних кислот в рослині, а також бере участь у вуглеводневому і азотному обміні.

В асортименті калійних добрив, що випускаються, переважають висококонцентровані форми – хлористий калій та 40%-ва калійна сіль. Сульфат калію застосовується в обмежених кількостях. У сільському господарстві також використовують сирі калійні солі та цементний пил [1].

За способом виробництва комплексні добрива поділяються на складні, комбіновані (складно-змішані) та змішані.

До **складних добрив** промислового виробництва відносять калієву селітру, амофос, діамфос. Їх одержують при хімічній взаємодії вихідних компонентів.

Змішані добрива – це суміші простих добрив, одержувані в заводських умовах або на місцях використання добрив шляхом сухого змішування.

До **складнозмішаних** (комбінованих) відносяться комплексні добрива, одержувані в єдиному технологічному процесі. Вони містять в одній гранулі два або три основних елементи живлення рослин, хоч і у вигляді різних хімічних сполук. Їх виробляють шляхом спеціальної як хімічної, так і фізичної

обробки первинної сировини або різних одно- та двокомпонентних добрив. Сюди відносяться: нітрофос і нітрофоска, нітроамофос і нітроамофоска, поліфосфати амонію і калію, карбоамофоси тощо [1-3].

Проаналізувавши існуючі види мінеральних добрив, бачимо, що серед них азотовмісні добрива (насамперед, аміачна селітра, карбамід, діамонійфосфат) відіграють вирішальну роль у підвищенні врожаю всіх сільськогосподарських культур. Зростання і розвиток, утворення нового листа, коріння, квіток, плодів та інших органів рослин залежать від достатнього надходження азоту.

Також слід зазначити, що в цих добривах азот знаходиться в дуже рухливій формі. А тому, поряд з позитивними якостями (висока концентрація основних поживних елементів) вони мають суттєвий недолік – значна розчинність у ґрунті, що може призвести до створення умов пригнічення росту та розвитку рослин, а також сприяє вимиванню добрив з ґрунту. При цьому значно зменшується коефіцієнт використання добрив.

Таким чином, азотовмісні добрива більш за інші потребують покриття їх поверхні органічною речовиною: азот, що входить до складу деяких добрив, залучається в шар компонентів з відносно низькою розчинністю, що забезпечує довготривалість його дії на ґрунт та рослину.

1.1.3 Мета та методи капсулювання гранульованих мінеральних добрив. Види капсульованих гранул

У виробництві, транспортуванні та застосуванні гранульованих мінеральних добрив ще існують невирішені проблеми. У результаті високої крихкості гранули руйнуються в процесі зберігання, транспортування і внесення добрив, що сприяє утворенню з них пилу, робить їх незручними для обробки і використання. Крім того, вибухова небезпека деяких компонентів (наприклад, аміачна селітра) вимагає його ізоляції від контакту з відновними агентами [26].

Не менш важливою проблемою в порівнянні з вище зазначеними є проблема втрат корисних, доступних для рослин живильних компонентів в процесі транспортування, збереження та застосування мінеральних добрив.

Відомо [1, 3, 26], що основними напрямками таких втрат є:

- втрати у вигляді газоподібних виділень (випаровування) корисних компонентів;
- вимивання живильних компонентів атмосферними опадами та поливальними водами з переведенням доступних для рослин живильних компонентів у горизонти ґрунту, які не доступні кореневій системі рослин;
- перетворення доступних для рослин живильних компонентів у нерозчинні, не доступні для рослин речовини.

Зменшення зазначених втрат корисних компонентів добрив є задачею, що поєднує в собі агротехнологічні, екологічні та економічні проблеми. Сьогодні зазначені проблеми в більшості випадків вирішують шляхом покриття поверхні гранул захисними оболонками, тобто поживні елементи, що входять до складу добрив, переводять до класу компонентів з відносно низькою розчинністю, що забезпечує довготривалість їх дії на ґрунт та рослину [26]. Оболонка захищає речовини, що перебувають усередині капсул, від дії зовнішнього середовища, забезпечує точне дозування речовин, маскує їх запах, смак, колір, знижує летючість, токсичність, пожежонебезпеку тощо [27-29]. Як результат, це підвищує коефіцієнт використання отриманих добрив і дозволяє різко зменшити їх внесення у ґрунт.

Широке застосування капсульованих речовин, які різняться за агрегатним станом, розмірами тощо, спричинило розроблення значної кількості методів отримання таких речовин [30]. До них належать: фізико-хімічні методи, які передбачають, коацервацію, осадження нерозчинником, утворення нової фази за зміни температури, випаровування леткого розчинника, затвердіння розплавів у рідких середовищах, екстракційне заземлення, висушування розпилюванням, фізичну адсорбцію; хімічні методи – утворення нової фази зшиванням полімерів, поліконденсацією і полімеризацією; фізичні методи –

напилення у псевдозрідженому стані, екструзія, конденсація парів, дражування та подвійне пресування [27].

Одержувані такими методами гранули пролонгованої дії умовно можна поділити на (рисунок 1.2) [31]:

1) Гранули з однокомпонентною оболонкою:

- а) тонка оболонка ($\delta < 0,1 \cdot D$);
- б) товста оболонка ($\delta > 0,1 \cdot D$);

2) Гранули з композиційною оболонкою;

3) Гранули з багатошаровою оболонкою;

4) Каркасні гранули.

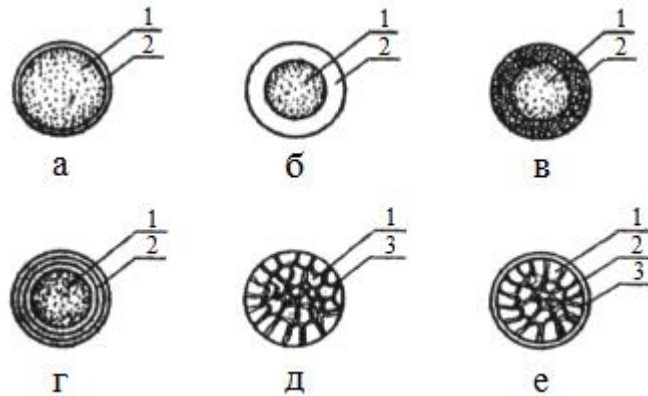


Рисунок 1.2 – Типи структур гранул пролонгованої дії:

а – гранула з однокомпонентною тонкою оболонкою; б – гранула з однокомпонентною товстою оболонкою; в – гранула з композиційною оболонкою; г – багатошарова гранула; д – каркасна гранула; е – каркасна гранула, що вкрита оболонкою; 1 – основна речовина; 2 – оболонка; 3 – каркас

Матеріалами тонких оболонок є полімерні матеріали [32-34]. Такі оболонки мають невисоку локальну механічну міцність. А через високу вартість покриття товщину оболонки намагаються максимально зменшити.

Що стосується товстих оболонок, то в якості матеріалів для їх виготовлення використовують як органічні, так і неорганічні речовини (гіпс, бітум, парафін тощо). Механічна міцність такого продукту досить велика.

Композиційна оболонка гранул складається з двох елементів: наповнювача й сполучної речовини. Вони характеризуються високою механічною міцністю і тривалим часом розчинення. Сировиною для їх виготовлення можуть служити відходи різних виробництв.

Багатошарова гранула складається з ядра, покритого декількома оболонками з різних речовин. Багатошарові гранули виготовляють або з технологічних міркувань, або для досягнення заданої кінетики розчинення. Змінюючи вид, кількість і послідовність нанесення оболонки можна отримувати гранули пролонгованої дії практично з будь-якою кінетикою розчинення. Такі гранули можуть вивільняти необхідні речовини в різні періоди розчинення і можуть володіти значним терміном дії.

Каркасна гранула складається з каркасу, простір усередині якого заповнений речовиною, що розчиняється. Осередки всередині каркасу можуть бути як сполученими, так і несполученими один з одним. Каркас значно збільшує механічну міцність гранули і набагато зменшує швидкість вивільнення основної речовини з гранули, особливо у випадку з несполученими осередками.

Каркасні гранули, що вкриті однією або кількома оболонками, мають високу механічну міцність навіть при повному розчиненні мінеральної речовини. Вони володіють деякими перевагами, як звичайних каркасних, так і багатошарових гранул.

І найголовніше, усі розглянуті структури гранул мають пролонговану дію, тобто, поживні елементи вивільнюються дозовано, протягом тривалого часу [35-38].

Таким чином, метою процесу капсулювання є отримання дисперсних матеріалів, покритих функціональною оболонкою, за допомогою якої вони набувають нових властивостей. Важливим аспектом у цьому питанні є максимально точно їх прогнозування, яке повністю залежить від параметрів покриття: фізико-хімічних характеристик плівкоутворювача та товщини оболонки [27].

1.2 Вибір матеріалу захисної оболонки

Для капсулювання гранульованих мінеральних добрив можуть використовуватися різні речовини. Наприклад, для капсулювання карбаміду на ПрАТ «Севєродонецьке об'єднання Азот» використовується карбамідоформальдегідна смола марки КФС-К. Цю ж саму речовину автор [39] пропонує застосовувати для покриття складних добрив. Основним її недоліком є високий вміст вільного формальдегіду – токсичної речовини, а також труднощі в одержанні на поверхні гранул суцільної полімерної плівки. В якості матеріалу оболонки також використовують епоксидні, поліефірні, карбамідні смоли, сірку, фосфогіпс, парафін тощо [40-52]. Більшість використовуваних речовин не розчиняються у ґрунті. Як наслідок, з кожним внесенням таких добрив збільшується забрудненість ґрунту, що негативно впливає на подальшу його експлуатацію.

Також утворення суцільної оболонки на поверхні мінеральних гранул може відбуватися в наслідок реакції двох або більше речовин. Прикладом такої технології є інкапсульована частинка [47], що складається з ядра та, розташованої навколо нього, оболонки. Ядро включає мінеральне добриво, а в якості оболонки використовується поліуретановий шар, який є продуктом реакції ароматичного ізоціанатного компоненту і поліолу. Основним недоліком отриманого таким чином добрива є вміст поліуретану – хімічної речовини, яка дуже довго розкладається у ґрунті з виділенням токсичних речовин, а також труднощі в одержанні на поверхні гранул суцільної полімерної плівки.

Відоме гранульоване мінеральне добриво [26], яке містить ядро, що включає або азотні, або фосфорні, або калієві живильні речовини, або їх комбінації і покрите оболонкою на основі неорганічної речовини. В якості неорганічної речовини як основи оболонки використовують глауконіт. Недоліками цього винаходу є те, що глауконіт являє собою мінерал, який разом з ядром, також мінерального походження, надходить у ґрунт, а це сприяє

підвищенню кислотності ґрунту та створенню високої концентрації поживних речовин, що негативно впливає на розвиток рослин.

Відомий спосіб [48] отримання капсульованих повільнодіючих добрив шляхом нанесення на поверхню гранул суспензії фосфогіпсу в 20-50 %-му розчині карбамідної смоли при температурі 70-90°C впродовж 2-3 хвилин. Проте цей спосіб не унеможлиблює злипання і злежування гранул і разом з цим капсули з фосфогіпсовим покриттям не відрізняються високими властивостями міцності.

Відомий також спосіб [49] отримання капсульованих повільнодіючих добрив шляхом нанесення на поверхню гранул, нагрітих до 100-120°C декількох шарів епоксидної смоли через рівні проміжки часу (10-20 хвилин). Недоліками такого способу є велика продуктивність процесу виготовлення і необхідність використання дорогої сировини (епоксидних смол).

Ще одна відома технологія одержання капсульованого добрива передбачає наступне: до часток добрив порціями додають водний розчин конденсату сечовини з формальдегідом [50]. Після кожного додавання шихту перемішують, гранулюють і сушать при 80°C впродовж 30 хвилин. Цей спосіб також має вищезгадані недоліки.

Широка гама матеріалів, які застосовуються для капсулювання гранульованих мінеральних добрив, призводять до різкого їх подорожання, а також сприяють внесенню у ґрунт сторонніх баластових речовин, що значною мірою погіршує стан ґрунту і довкілля.

Речовина, що використовується в якості оболонки для нанесення на гранули мінеральних добрив, повинна:

- мати природне походження, щоб не зашкоджувати ґрунтовим мікроорганізмам та людині з урожаєм, вирощеним на цих добривах;
- створювати на поверхні гранули захисний шар, через який волога з ґрунту могла проходити до гранули, а утворений всередині гранули поживний розчин міг би виходити назовні гранули;

- мати значну твердість та міцність, щоб не сколюватися з гранули під час транспортування та пересипання;
- бути доступною та мати невелику кошторисну вартість.

Загальний обсяг тваринницьких відходів значно перевищує відходи побутової діяльності людини, що вимагає збільшення площ для їх зберігання. Виходячи з цього, перспективним є в якості такої речовини використовувати органічні відходи тваринницького походження – гній та послід, які повною мірою відповідають вищенаведеним вимогам.

До речі, використання безпідстилкового посліду – досить складна проблема, адже його вихід становить близько 75% всього обсягу пташиного посліду [8]. Таким чином, залучення відходів господарської діяльності у біохімічний кругообіг сприяє, з одного боку, їхній утилізації, а з другого, – розширенню сировинної бази для виробництва нових добрив [21].

1.3 Обладнання для нанесення захисних оболонок на гранули мінеральних добрив

Процес нанесення захисних органічних оболонок на гранули мінеральних добрив можна назвати як капсулюванням, так і догранулюванням, оскільки при цьому спостерігається значне збільшення розмірів вихідних гранул. Тому для здійснення такого процесу може бути використане стандартне обладнання, призначене для гранулювання добрив [14-19]. Однак слід пам'ятати, що, на відміну від мінеральних речовин, органіка має свої особливості, до яких відносяться можливість пригорання та розкладання при високій температурі, підвищена здатність до злипання, комкоутворення.

Гранулювання обкочуванням об'єднує групу процесів, які характеризуються переміщенням порошку по поверхні апарату. При цьому частинки перекочуються по стінках самого апарату та між собою. Механізм і кінетика гранулоутворення істотно залежать від апаратурного оформлення процесу [14-18].

Гранулювання обкочуванням здійснюється переважно в апаратах барабанного і тарільчатого типів в присутності рідкої фази, яка вноситься разом із твердими компонентами або спеціально вводиться у вигляді розчинів або плавів [14, 15, 17].

Барабанні гранулятори (рисунок 1.3) прості за конструкцією, однак велике значення має ступінь зволоження матеріалу: слабо зволожений порошок буде погано гранулюватися, а якщо ввести розчину більше ніж достатньо – почнеться ковзання частинок по стінці барабана, внаслідок чого погіршується перемішування, знижується ефективність роботи апарату та зменшується його продуктивність.

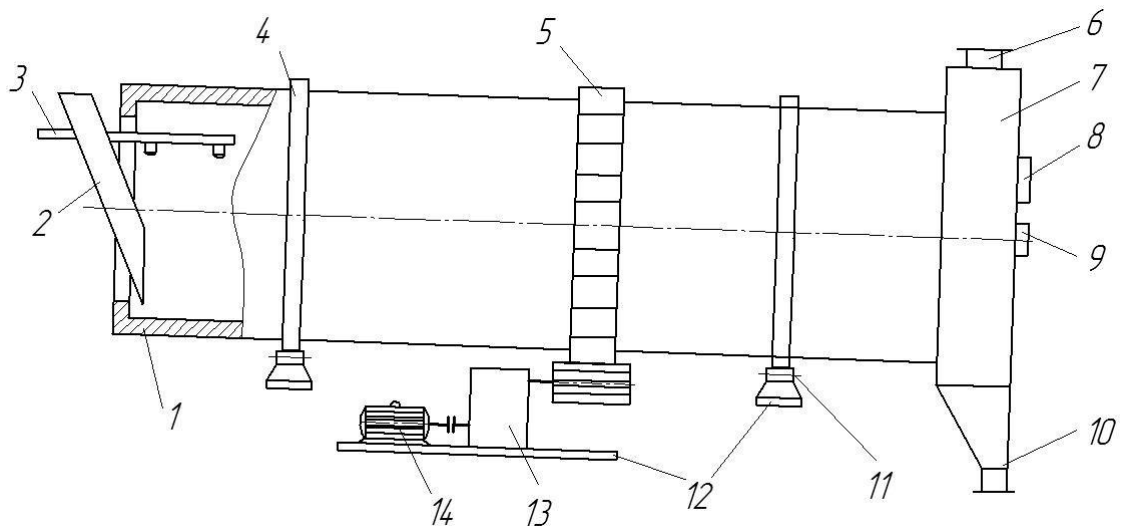


Рисунок 1.3 – Схема барабанного гранулятора: 1 – обичайка; 2 – патрубок для завантаження порошку; 3 – розподільник зв'язуючого; 4 – бандаж; 5 – вінцева шестерня; 6 – патрубок для відсмоктування парів; 7 – камера для вивантаження; 8 – вікно для підсвічування; 9 – оглядове вікно; 10 – патрубок для вивантаження гранул; 11 – опорний ролик; 12 – бетонні основи; 13 – редуктор; 14 – електромотор

Для збільшення висоти підйому матеріалу, а отже інтенсифікації процесу, застосовують різні пристосування – насадки. Вони являють собою нерухомі або обертові лопаті, які перешкоджають зісковзуванню порошку по внутрішній

поверхні барабану. Однак застосування цих пристроїв незначно збільшує ефективність роботи апаратів.

До основних недоліків таких апаратів слід віднести складність регулювання процесу, зважаючи на труднощі візуального контролю за ходом гранулювання. Також важко організувати автоматизований контроль і управління процесом, що пояснюється необхідністю враховувати безліч технологічних, конструктивних та інших факторів. Крім того, при великому навантаженні знижується ефективність роботи гранулятора, внаслідок зменшення живого перерізу апарату. Ще одним недоліком є полідисперсний склад кінцевого продукту, який потребує додаткової обробки.

Тарільчатий гранулятор (рисунок 1.4) працює по тому самому принципу, що і барабанний. Максимальна його продуктивність забезпечується при підйомі матеріалу до верхньої точки траєкторії, оскільки при цьому найбільш повно використовується поверхня тарілки. На продуктивність також впливають: діаметр тарілки, кутова швидкість, кут нахилу, висота борту та умови дозування вихідного матеріалу. За оптимальних умов роботи гранулятора кут нахилу тарілки і кутова швидкість – величини взаємозалежні. При порушенні цього не забезпечується максимальна продуктивність установки [17].

Тарільчаті гранулятори поки ще поступаються барабанним в продуктивності, однак мають численні переваги, що дозволяють їм у багатьох випадках замінити барабани. Вони більш економічні, компактні, вимагають менших капітальних вкладень і роблять можливим візуалізацію процесу. Також гранулятори цього типу забезпечують отримання монодисперсних гранул, щільність та міцність яких збільшуються в 1,5 рази, порівняно з барабанними [17].

До недоліків тарільчатих грануляторів можна віднести те, що вони мають вузькі межі робочих режимів внаслідок високої чутливості апарату до вмісту рідини в матеріалі і невеликий час перебування матеріалу в апараті [14, 15].

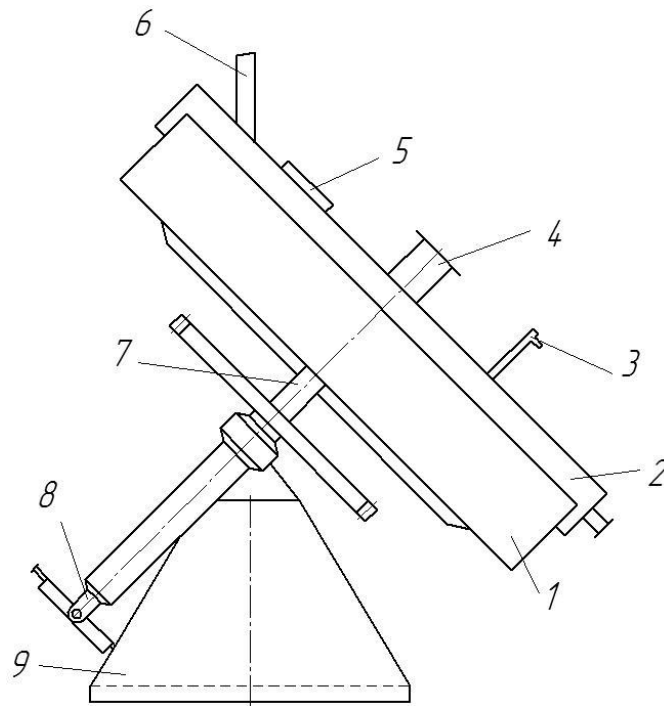


Рисунок 1.4 – Схема тарільчатого гранулятора: 1 – обертова тарілка; 2 – герметизуючий кожух; 3 – форсунка для подачі рідини; 4 – патрубок для відсмоктування парів; 5 – оглядове вікно; 6 – патрубок для подачі порошку; 7 – вал; 8 – механізм для зміни кута нахилу тарілки; 9 – рама

На рисунку 1.5 представлена схема плівково-дисперсного агрегату для капсулювання зернистих матеріалів [31].

Принцип роботи агрегату полягає в наступному: плівкоутворювач 3 трансформує струминну течію рідини в плівкову, що дозволяє отримати вільно поточну закручену рідинну плівку (ВПЗРП) 8. У результаті проникнення крізь ВПЗРП гранули покриваються поверхневим шаром рідини. Далі при русі гранул в потоці газу покриття твердішає і виводиться з камери 2.

Недоліком плівково-дисперсного агрегату є складність створення рівномірної товщини плівки, а отже велика ймовірність того, що покриття на гранулі буде нерівномірним. А у випадку роботи з в'язкими органічними речовинами організувати суцільну плівку майже неможливо.

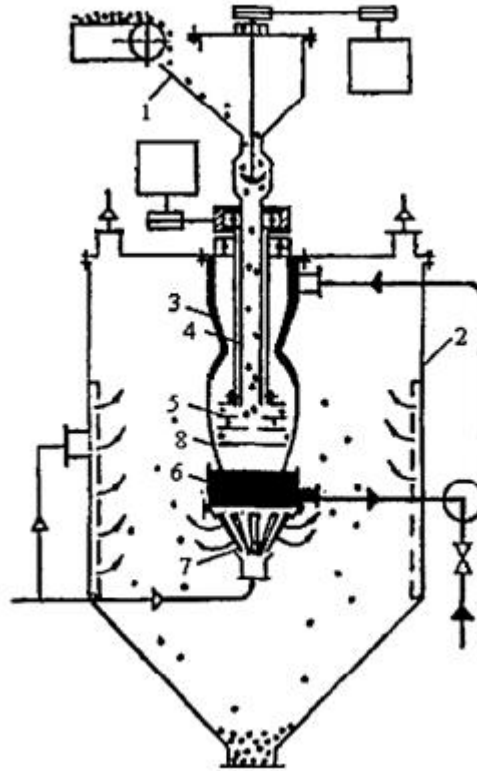


Рисунок 1.5 – Схема плівково-дисперсного агрегату для капсулювання зернистих матеріалів: 1 – бункер; 2 – робоча камера; 3 – відцентровий плівкоутворювач; 4 – труба для подачі гранул; 5 – розкидач; 6 – приймач рідини; 7 – розподільник газу; 8 – вільно поточна закручена рідинна плівка

Серед всіх різновидів дисперсних потоків найбільш значну роль в сучасній техніці відіграє киплячий шар [53-64]. Капсулювання дисперсних матеріалів у стані псевдозрідження є поширеним фізичним методом нанесення полімерних оболонок, який використовується в хімічній та суміжних галузях. Техніка псевдозрідження набула широкого застосування завдяки високій інтенсивності процесів. За характером руху частинок можна виділити два основних типи апаратів: киплячого і фонтануючого шарів [55-58].

Псевдозрідження в апаратах циліндричного типу (рисунок 1.6), які мають постійний поперечний переріз, можна поділити на декілька типів: струменеве, бульбашкове та поршневе [55, 59]. Всім їм властивий різний ступінь неоднорідності шару та виникнення застійних зон. Циліндричні апарати

доцільно застосовувати для капсулювання матеріалів, схильних до злипання. Псевдозріджувальне повітря по всьому перерізу апарата має постійну швидкість, що сприяє активнішій поведінці гранул та запобігає їх злипанню [60].

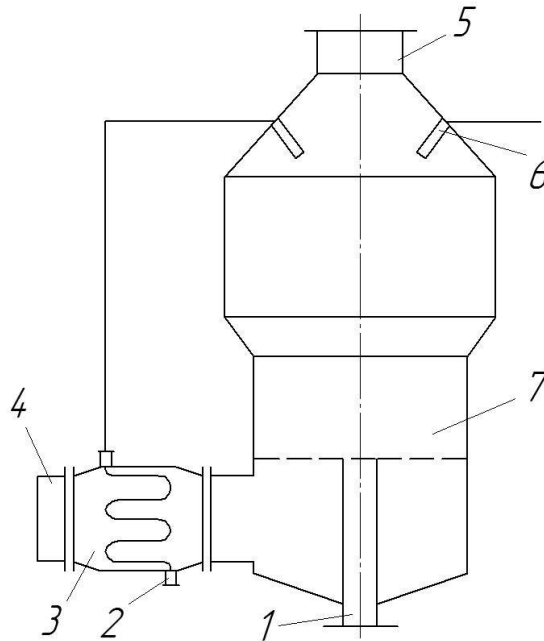


Рисунок 1.6 – Схема циліндричного апарата киплячого шару з центральним вивантаженням: 1 – патрубок для вивантаження продукту; 2 – патрубок для введення рідини; 3 – калорифер; 4 – патрубок для введення теплоносія; 5 – патрубок для виходу відпрацьованого теплоносія; 6 – форсунка для рідини; 7 – корпус апарата

Псевдозрідження в конічних (рисунок 1.7) та конічно-циліндричних (рисунок 1.8) апаратах має певні особливості. Апаратам таких конструкцій характерне утворення фонтануючого шару: псевдозріджувальний агент захоплює тверді частинки і фонтаном викидає їх нагору до периферії, далі вони рухаються униз вздовж бокової поверхні конуса. Конічні та комбіновані (конічно-циліндричні) апарати застосовують для капсулювання малозлипаючих по покриттю матеріалів. Така форма апаратів дає можливість проводити покриття гранул в більш прийнятних аеродинамічних умовах [58-60].

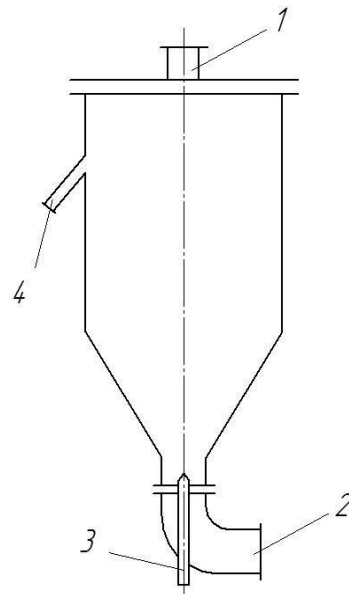


Рисунок 1.7 – Схема конічного апарата з фонтануючим шаром: 1 – патрубок для виходу теплоносія; 2 – патрубок для введення теплоносія; 3 – форсунка рідини; 4 – патрубок для виведення продукту

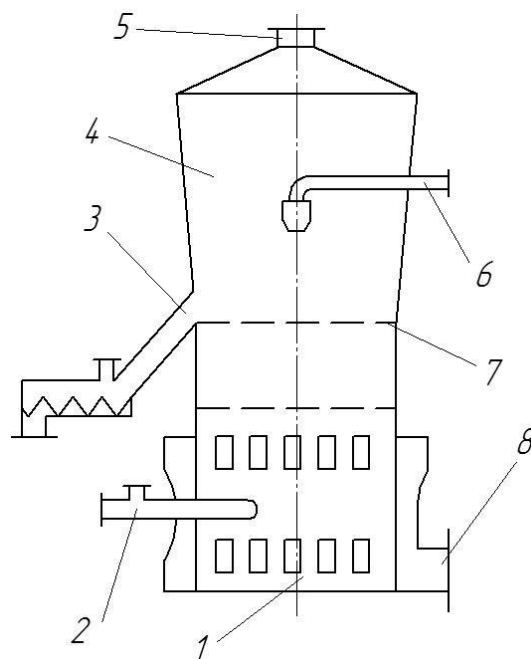


Рисунок 1.8 – Схема конічно-циліндричного апарата киплячого шару з вбудованою топкою і подачею рідини на шар: 1 – вбудована топка; 2 – газова горілка; 3 – патрубок для вивантаження гранул; 4 – корпус апарата; 5 – патрубок для відводу відпрацьованого теплоносія; 6 – механічна форсунка; 7 – газорозподільна решітка; 8 – патрубок для введення теплоносія

Таким чином, апарати з псевдозрідженим шаром мають ряд переваг:

- розвинена поверхня фазового контакту;
- висока інтенсивність процесів тепло- та масообміну;
- висока питома продуктивність, невеликі габарити;
- можливість безперервного ведення процесу за його повної автоматизації та механізації;
- висока якість отриманого продукту;
- суміщення процесів зневоднення та гранулювання, що значною мірою спрощує схему виробництва.

До недоліків апаратів псевдозрідженого шару можна віднести різний час перебування частинок в апараті, необхідність ретельного очищення відпрацьованого повітря та унесення матеріалу (в першу чергу компонентів суспензії).

Відходи тваринницького походження мають вигляд дуже зволжених суспензій. Органічна суспензія містить багато колоїдних частинок, які створюють в'язку структуру. Фракційний склад твердих (зважених) частинок різноманітний і змінюється в залежності від виду і віку тварин, кормового раціону та попередньої обробки компонентів, що входять до його складу [65, 66]. Таким чином, щоб мінімізувати витрати на обробку вологих органічних речовин, для процесу капсулювання доцільно використовувати апарати з киплячим шаром. Тваринницькі відходи мають природну липкість, завдяки чому при набризкуванні їх на поверхню мінеральної речовини відбувається гарне злипання і не треба додатково вводити спеціальну хімічну речовину для підвищення зхвачуваності мінеральної гранули з покриттям.

1.4 Теплообмін процесу капсулювання у киплячому шарі

Теплообмін процесу капсулювання в апаратах киплячого шару відрізняється від сушіння тим, що на поверхню частинок постійно подається розчин (суспензія). В такому разі інтенсивність теплообміну функціонально

залежить від швидкості та температури повітря, розмірів частинок та їх фізико-хімічних властивостей тощо [67-80].

Найважливішим фактором, що визначає кінетику росту гранул є характер взаємодії між краплями розчину і частками. Перша спроба аналізу контакту гранул з краплями розчину належить В.Ф. Волкову [80]. Він розраховував випаровування плівки розчину, який повністю охоплює гранулу, за умови суміщеного підведення тепла – кондукцією від гранули і конвекцією від псевдозріджуючого агента шляхом вирішення спрощеної задачі теплообміну сфери з середовищем постійної температури. Отриманий результат має вигляд критеріальної залежності:

$$Nu_{E\Phi} = A \cdot \frac{2 \cdot \lambda_T}{\lambda_G} \cdot \frac{T_R - T_{R+\Delta}}{T_{III} - T_{R+\Delta}} \cdot Bi + B \cdot Nu_{Нест}, \quad (1.1)$$

де λ_T, λ_G – теплопровідність твердого матеріалу і газу відповідно;

$T_R, T_{R+\Delta}, T_{III}$ – температура поверхні гранули, плівки і шару відповідно;

$Nu_{E\Phi}, Nu_{Нест}$ – значення критерію Нуссельта: ефективне та розраховане за рівнянням Нестеренко;

Bi – критерій Біо;

A, B – емпіричні константи.

У випадку, коли теплопровідністю всередині частинок знехтувати не можна, процес теплопереносу в об'ємі твердої кулястої частинки за умови, коли частки містять певну кількість вологи, запишеться у вигляді системи [63, 64]:

$$\begin{cases} \frac{\partial t}{\partial \tau} = a_T \cdot \left[\frac{\partial^2 t}{\partial r^2} + \frac{2}{r} \cdot \frac{\partial t}{\partial r} \right] + \frac{\varepsilon^* \cdot r_C}{c_T} \cdot \frac{\partial U}{\partial \tau} \\ \frac{\partial U}{\partial \tau} = k \cdot \left[\frac{\partial^2 U}{\partial r^2} + \frac{2}{r} \cdot \frac{\partial U}{\partial r} \right] + k \cdot \sigma^* \cdot \left(\frac{\partial^2 t}{\partial r^2} + \frac{2}{r} \cdot \frac{\partial t}{\partial r} \right), \end{cases} \quad (1.2)$$

де t – поточна температура частинки, °C;

U – вологовміст матеріалу, $кг/кг$;

τ – час, $с$;

a_T – коефіцієнт температуропровідності твердої частинки, $м^2/с$;

r – поточний радіус частинки, $м$;

ε^* – критерій фазового перетворення;

r_C – питома теплота випаровування, $Дж/кг$;

c_T – питома теплоємність твердої частинки, $кДж/(кг \cdot K)$;

k – коефіцієнт потенціалопровідності;

σ^* – термоградієнтний коефіцієнт переносу вологи.

Кінетика процесу сушіння твердих сферичних частинок, що описується системою диференціальних рівнянь (1.2), являє собою сполучену задачу тепломасопереносу. Під час грануляції рідка фаза наноситься на поверхню гранул тонкою плівкою. Маючи достатню інтенсивність процесу сушіння, приймаємо, що випаровування вологи відбувається з поверхневого шару гранул, а отже, критерій фазового перетворення, градієнт вологовмісту і зміна вологовмісту у часі всередині гранули близькі до нуля.

Таким чином, диференціальне рівняння масопереносу всередині гранули втрачає сенс, а диференціальне рівняння теплопереносу, ускладнене фазовим переходом, за умови, що критерій фазового перетворення прагне до нуля, перетворюється в диференціальне рівняння нестационарної теплопровідності. Для розв'язку останнього необхідно визначити значення встановлених констант, які, у свою чергу, залежать від величини критерію Біо [64]:

$$Bi = \frac{\alpha \cdot R}{\lambda_T}, \quad (1.3)$$

де α – поверхневий коефіцієнт тепловіддачі, $Вт/(м^2 \cdot K)$;

R – радіус частинки, $м$;

λ_T – коефіцієнт теплопровідності, $Вт/(м \cdot K)$.

Для визначення величини коефіцієнта тепловіддачі, який входить до складу рівняння (1.3), необхідно визначити явний вигляд функції $Nu=f(Re,Pr)$. Узагальнення експериментальних даних проводиться на основі функціональної залежності між критеріями теплової та гідродинамічної подібностей за допомогою загальновідомого рівняння конвективного теплообміну:

$$Nu = A \cdot Re^n \cdot Pr^m. \quad (1.4)$$

Враховуючи, що фізичні параметри повітря будуть змінюватися у вузькому діапазоні, приймається $Nu \sim Pr^{0,33}$.

У наведеному критеріальному рівнянні (1.4) авторами [27, 79] визначені невідомі коефіцієнти A , n , m , проте безпосередньо їх використовувати для інших матеріалів або умов сушіння неможливо, бо це призводить до значних похибок у розрахунках.

1.5 Теоретичні основи кінетики росту гранул у киплячому шарі

Точний опис кінетики росту гранул є завданням, яке складно реалізується, тому для розрахунків використовують ряд припущень, а також емпіричні і напівемпіричні залежності [81-101].

Основні залежності для розрахунку швидкості росту гранул, що запропоновані до теперішнього часу, базуються на їх рівномірно-поверхневому, так званому «нормальному», зростанні.

Найпростіший лінійний закон швидкості росту гранул (кінетика нульового порядку) запропонований Лі [81]. Висновок цього закону базується на допущенні пропорційності масової швидкості росту поверхні частинок:

$$\frac{dm}{d\tau} = \lambda \cdot l^2, \quad (1.5)$$

де l – лінійний розмір гранул, m ;

τ – час проведення процесу, s .

Вираз нульового порядку, тобто незалежності швидкості від розміру частинок, випливає зі співвідношення (1.5) автоматично. Намагаючись врахувати неоднорідність шару з точки зору ймовірності попадання розчину на гранули, Лі ввів ряд принципово невизначених коефіцієнтів, які ускладнюють виведення:

$$\lambda = \frac{K - C}{3 \cdot b \cdot \rho_T}, \quad (1.6)$$

$$K = \frac{k \cdot k_1 \cdot k_2 \cdot V_1 \cdot \rho_T \cdot (1 - \varepsilon)}{W} \cdot \left[1 - \frac{\rho_T \cdot (1 - \varepsilon)}{\rho_{НАС}} \right], \quad (1.7)$$

де K – константа;

C – коефіцієнт, що враховує стирання;

b – безрозмірний фактор форми;

ρ_T – щільність твердої фази, kg/m^3 ;

k_1 – коефіцієнт, що враховує розрідження шару в струменевій зоні;

k_2 – коефіцієнт, що враховує попадання частинок в струменеву (факельну) зону;

ε – пористість шару, m^3/m^3 ;

W – маса шару, kg ;

V_1 – обсяг конуса струменя, m^3 ;

$\rho_{НАС}$ – насипна щільність, kg/m^3 .

Набагато більш прості й правомірні міркування привів Гриммет [82], який виходив з припущення про рівномірність попадання кожної частинки в зону зрошення, стаціонарності системи і про ідентичність механізму зростання поверхні кожної частки. В такому випадку маємо, що

$$\lambda = \frac{dx}{d\tau} = \frac{(G_M / \rho_T)}{\sum_1^n A_i \cdot N_i} = const, \quad (1.8)$$

де G_M – продуктивність по твердій фазі, кг/с;

ρ_T – щільність твердої фази, кг/м³;

A_i, N_i – поверхня частинки i -тої фракції та число часток у ній відповідно (тоді

$\sum_1^n A_i \cdot N_i$ – повна поверхня часток у шарі, м²).

Таким чином, запропоновані гіпотези стосовно швидкості зростання окремих гранул λ при зневодненні розчинів в киплячому шарі ґрунтуються на інтегральному характері залежності λ від повної поверхні частинок у шарі F_{III} :

$$G_M = 4 \cdot \pi \cdot \rho_T \cdot \int_0^\infty \lambda \cdot x^2 \cdot \rho(x) dx. \quad (1.9)$$

При цьому, якщо λ не залежить від x (закон нульового порядку), то з виразу (1.8) випливає:

$$\lambda = \frac{dx}{d\tau} = \frac{G_M}{4 \cdot \pi \cdot \rho_T \cdot \int_0^\infty x^2 \cdot \rho(x) dx} = \frac{G_M}{\rho_T \cdot F_{III}}. \quad (1.10)$$

Виходячи з допустимості різної тривалості перебування часток різного розміру в зоні розпилення запропоновано рівняння для швидкості зростання гранул:

$$\frac{dD}{d\tau} = \frac{2 \cdot G_M}{\rho_T \cdot F_{III}} \cdot (A + B \cdot D), \quad (1.11)$$

де A, B – довільні константи;

D – діаметр часток, м.

Недоліком методики Гриммета є її лінійна спрямованість і використання важко визначальної і неоднозначної величини – повної поверхні частинок в шарі F_{III} .

Визначення швидкості росту гранул також можливо за допомогою нестационарної методики [100], яка полягає в тому, що в киплячий шар монодисперсної вихідної «подушки» безперервно подається суспензія, тверда фаза якої відкладається на поверхні частинок і призводить в періодичному процесі (число частинок в шарі постійне, тверда фаза не виводиться) до безперервного укрупнення гранул в шарі. Якщо припустити, що швидкість росту окремих гранул не залежить від їх розміру, то збільшення середнього діаметра часток для такого процесу підпорядковується залежності:

$$\frac{dD}{d\tau} = \frac{1}{3} \cdot \frac{G_M}{\rho_T \cdot G_{B.P.}} \cdot D, \quad (1.12)$$

де $G_{B.P.}$ – маса вихідної «подушки», кг.

У роботі [57] кінетику збільшення полімерної оболонки на поверхні кулястої частинки виражено диференціальним рівнянням вигляду:

$$dW_n = PCd\tau, \quad (1.13)$$

де dW_n – приріст маси покриття на поверхні частинок, кг;

P – витрата розчину-плівкоутворювача, який подається у псевдозріджений шар частинок, m^3/c ;

C – концентрація полімеру в розчині, kg/m^3 .

Під час розробки математичної моделі приймали допущення, що всі частинки в шарі одного розміру, на поверхню яких наноситься полімерна оболонка постійної товщини. Збільшення товщини оболонки призводить до збільшення діаметра частинки, що виражається диференціальним рівнянням:

$$dW_n = \pi d^2 N \rho_n d \frac{d}{2}, \quad (1.14)$$

де N – кількість частинок у шарі;

$\pi d^2 N$ – загальна площа частинок, m^2 ;

$d(d)$ – приріст діаметра частинки, m ;

ρ_n – густина плівкоутворювача, kg/m^3 .

Рішення системи рівнянь (1.13) і (1.14) дає залежність для визначення товщини покриття в будь-який момент часу:

$$\delta = \frac{1}{2} d_0 \left(\sqrt[3]{1 + \frac{PC\rho_T}{M_T\rho_n} \tau} - 1 \right), \quad (1.15)$$

де ρ_T – густина частинки, kg/m^3 ;

M_T – загальна маса частинок, kg .

Аналогічний підхід застосовується у роботі [89]. Допускаючи, що у реальних капсульованих речовин порядок відношення товщини оболонки δ до радіусу частинки R пропорційний $1 \cdot 10^{-3}$, можемо знехтувати збільшенням площі поверхні частинки F у процесі капсулювання. На підставі цього припущення рішення системи рівнянь (1.13) і (1.14) запишеться у наступному вигляді:

$$\delta = \frac{k_p PC}{F \rho_n} \tau, \quad (1.16)$$

де k_p – коефіцієнт пропорційності, що враховує винос плівкоутворювача із робочої зони апарата та налипання на стінки корпусу.

Рівняння (1.16) також описує залежність товщини покриття від часу процесу капсулювання.

Рівняння (1.15) та (1.16) є «жорсткими», тобто недостатньо коректними, оскільки така модель не враховує ймовірності збільшення оболонки в псевдозрідженому шарі.

У роботі [90] в основу математичної моделі покладено рівняння нерозривності О.М. Тодеса, яке має вигляд:

$$\frac{\partial g}{\partial \tau} + 2 \cdot \left[\Lambda \frac{\partial g}{\partial D} + g \frac{\partial \Lambda}{\partial D} - \frac{3\Lambda g}{D} \right] = -S\psi K g + \varphi(D), \quad \tau > 0, 0 < D < \infty, \quad (1.17)$$

де g – функція масового розподілення гранул за розміром, $мм^{-1}$;

τ – час, $год$;

D – поточний діаметр гранул, $мм$;

Λ – лінійна швидкість росту гранул, $мм/год$;

S – функція сепаратора;

ψ – коефіцієнт гранулоутворення, *частки*;

K – константа вивантаження, $год^{-1}$;

$\varphi(D)$ – функція потужності джерела нових центрів грануляції, $(мм \cdot год)^{-1}$.

Враховуючи нульовий порядок росту гранул, рівняння (1.17) переписеться у вигляді:

$$\frac{\partial g}{\partial \tau} + 2 \cdot \left[\Lambda \frac{\partial g}{\partial D} - \frac{3\Lambda g}{D} \right] = -S\psi K g + \varphi(D), \quad \tau > 0, 0 < D < \infty. \quad (1.18)$$

Початкові умови: $g_0(D, \tau = 0) = f(D)$.

Граничні умови: $g(D = 0, \tau > 0) = 0$; $g(D \rightarrow \infty, \tau > 0) = 0$.

Для розв'язку рівняння (1.18) дослідним шляхом визначаються: коефіцієнт гранулоутворення ψ , лінійна швидкість росту гранул Λ , константа вивантаження K та функція масового розподілення гранул за розміром g .

Для функції розподілу часток за розмірами було запропоновано наступне рівняння [98, 99]:

$$F(D_i; D_{OK}) = 1 - \exp \left\{ - \frac{3 \cdot [G_P + (1 - K_{GP}) \cdot G_M]}{K_{GP} \cdot G_M} \cdot \ln \frac{D_i}{D_{OK}} \right\}, \quad (1.19)$$

де K_{GP} – коефіцієнт гранулоутворення;

G_M – продуктивність гранулятора, кг/ч;

G_P – продуктивність за рециклом, кг/ч;

D_i – поточний діаметр, мм;

D_{OK} – розмір часток рециклу, мм.

Внутрішній рецикл у цьому випадку визначається величиною $G_M(1 - K_{GP})$. Для розв'язання рівняння (1.19) необхідно експериментально визначити величину K_{GP} і знати точний розмір нових центрів грануляції, що утворюються під час процесу.

Висновки до першого розділу

1. Аналіз попередніх досліджень показує, що азотовмісні добрива характеризуються рядом недоліків, насамперед підвищеною розчинністю поживних речовин і, таким чином, мають негативний вплив на екологію навколишнього середовища.
2. Доведена можливість утилізації органічних відходів, що обґрунтовує необхідність і доцільність застосування екологічно безпечних органо-мінеральних добрив. У таких добривах поєднуються переваги обох видів: мінеральні солі забезпечують швидку їх дію, а органічні складові гарантують тривале постачання рослинам поживних елементів.
3. Показано, що із всіляких видів добрив найбільш ефективні органо-мінеральні пролонгованої дії, які пропонується отримувати шляхом покриття мінеральних добрив шаром органічної речовини.

4. Враховуючи, що вологість органічних відходів тваринного походження може сягати 90%, найбільш оптимальною технологією для нанесення відповідних оболонок є капсулювання в апаратах псевдозрідженого шару, яка дозволяє отримувати якісний продукт заданого гранулометричного складу.
5. Більшість розглянутих залежностей для розрахунку швидкості росту гранул мають спільний недолік – орієнтованість на монодисперсний шар гранул. Але гранульовані мінеральні добрива, що випускаються промисловістю, мають полідисперсний склад. Отже, актуальним є розробка такої математичної моделі, яка враховує зміну щільності розподілу гранул за розмірами в процесі їх покриття органічною суспензією.

РОЗДІЛ 2

ХАРАКТЕРИСТИКА ОБ'ЄКТІВ ДОСЛІДЖЕННЯ ТА МЕТОДИКИ ПРОВЕДЕННЯ ЕКСПЕРИМЕНТІВ

2.1 Характеристика карбаміду

Карбамід – це концентроване азотне добриво, відноситься до категорії універсальних, оскільки застосовується як основне добриво або підкормка для вирощування різноманітних сільськогосподарських культур на будь-якому ґрунті. Основним макроелементом даного виду добрива є азот, який присутній в концентрації не менше 46 % (в перерахунку на суху речовину).

Виробляється за допомогою синтезу аміаку і вуглекислого газу при високих тисках та температурі. Білий дрібнокристалічний продукт, добре розчинний у воді. Гігроскопічність карбаміду при температурі 20°C порівняно невелика. За нормальних умов злежується мало, зберігає задовільну розсипчастість. Особливо гарними фізичними властивостями карбамід володіє у гранульованому вигляді (таблиця 2.1) [102].

Таблиця 2.1 – Гранулометричний склад карбаміду

Розмір гранул	Гранулометричний склад, %			
	Вищий сорт	1-ий сорт	2-ий сорт	Роздрібна торгівля
від 1 до 4 мм, не менше	94	94	94	–
від 2 до 4 мм, не менше	70	50	–	–
менше 1 мм, не більше	3	3	5	–
залишок на ситі 6 мм	Відсутність	Відсутність	Відсутність	–

При поверхневому розміщенні добрива присутні втрати азоту внаслідок випаровування аміаку з вуглекислого амонію (особливо на карбонатних і лужних ґрунтах): $(\text{NH}_4)_2 \text{CO}_3 = \text{NH}_4 \text{HCO}_3 + \text{NH}_3$.

У даний час, незважаючи на зростання випуску складних та комплексних добрив, інтерес до карбаміду з боку сільгоспвиробників тільки збільшується: його споживання серед всієї азотної групи добрив становить приблизно 35 %. Таким чином, виробництво і продаж карбаміду стабільно зростає.

2.2 Характеристика курячого посліду

Курячий послід – це концентрована органічна речовина, що містить всі основні поживні елементи. Курячий послід використовується як швидко- і сильнодіюче добриво, оскільки поживні речовини в ньому знаходяться у легкодоступній для рослин формі. Вміст поживних елементів у посліді значно залежить від способу його зберігання, виду птиці, її породного складу, віку, якості корму (таблиця 2.2) [8].

Таблиця 2.2 – Хімічний склад пташиного посліду, % на сиру речовину

Вода (H ₂ O)	Азот (N)	Фосфор (P ₂ O ₅)	Калій (K ₂ O)	Кальцій (CaO)	Магній	Сірка
53-57	0,7-1,9	1,6-2,0	0,8-1,0	2,4	0,7	0,4

pH фактор (кислотність) курячого посліду також змінюється згідно віку та раціону харчування птахів. Кислотність курячого посліду знаходиться в діапазоні pH фактора 6,5-8,0, що є близьким до помірно лужного. За такої тенденції курячий послід є придатним для використання практично на всіх типах ґрунтів [65].

У промисловому птахівництві використовують два основних способи прибирання посліду: механічний та гідрозмив. У зв'язку з цим розрізняють

природний безпідстилковий послід вологістю 65-70%, напіврідкий – 91-95% й стічні води – понад 95% води. Чим більше води, тим нижча концентрація в пташиному посліді поживних речовин.

Пташиний послід містить багато макро- і мікроелементів, концентрація натрію, магнію і кальцію у ньому в 6-9 разів більша, ніж у безпідстилковому гної худоби, вміст цинку становить 215, міді – 33 і марганцю – 183 мг на 1 кг посліду [8, 65].

2.3 Експериментальна установка для капсулювання мінеральних добрив

Дослідження процесу капсулювання гранульованих мінеральних добрив органічною оболонкою проводилися на лабораторній установці (рисунок 2.1). У якості ядра використовувалося гранульоване мінеральне добриво – карбамід.



Рисунок 2.1 – Експериментальна установка для капсулювання добрив

До складу установки (рисунок 2.2) входить продуктова камера 1, яка виконана з органічного скла, що уможлиблює візуалізацію досліджуваного процесу. Капсулювання безпосередньо відбувається в киплячому (псевдозрідженому) шарі. Для цього створюється зона заввишки 150-200 мм, яка обмежена:

- знизу решіткою 2, що являє собою лист з отворами малого діаметру, через які організується вихід газу окремими вертикальними струменями;
- з боків вертикальними стінками продуктової камери 1;
- зверху – вільний простір – сепараційна зона, куди мають змогу підніматися на деяку висоту гранули і знову опускатися в шар.

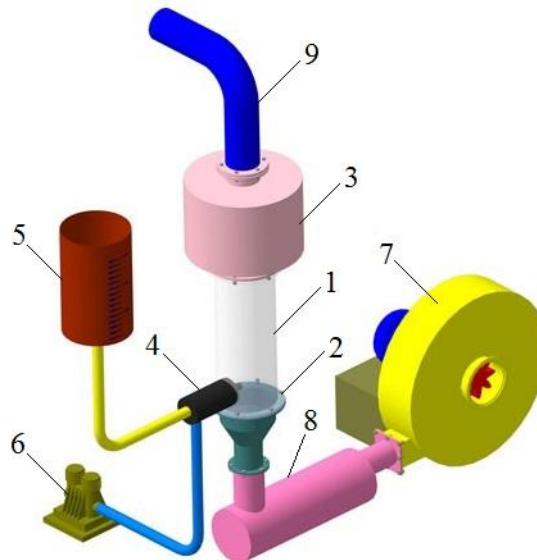


Рисунок 2.2 – Схема експериментальної установки для капсулювання добрив:
 1 – продуктова камера; 2 – газорозподільна решітка; 3 – кришка апарата; 4 – пневматична форсунка; 5 – мірний бачок; 6 – компресор; 7 – газодувка; 8 – калорифер; 9 – гофра

Збоку апарата, приблизно в середню по висоті частину шару, встановлена пневматична форсунка 4 (рисунок 2.3), до якої підведене стиснене повітря і рідка органіка, що являє собою суспензію – суміш рідини та дрібних (10-20 мкм) органічних частинок.



Рисунок 2.3 – Місцезположення пневматичної форсунки

Попередньо, до потрапляння у мірний бачок 5, вихідна органіка (рідкий курячий послід) проходить тонке тристадійне подрібнення на лабораторному млині (рисунок 2.4). Курячий послід потрапляє в робочу зону (зону подрібнення), обмежену з двох боків абразивними кругами. У цій зоні під дією зрізаючих та розтягуючих сил відбувається руйнування (стирання) твердих включень суспензії. Після кожної стадії подрібнення зазор між кругами зменшується. Отже, після третьої стадії маємо однорідну гомогенну масу.

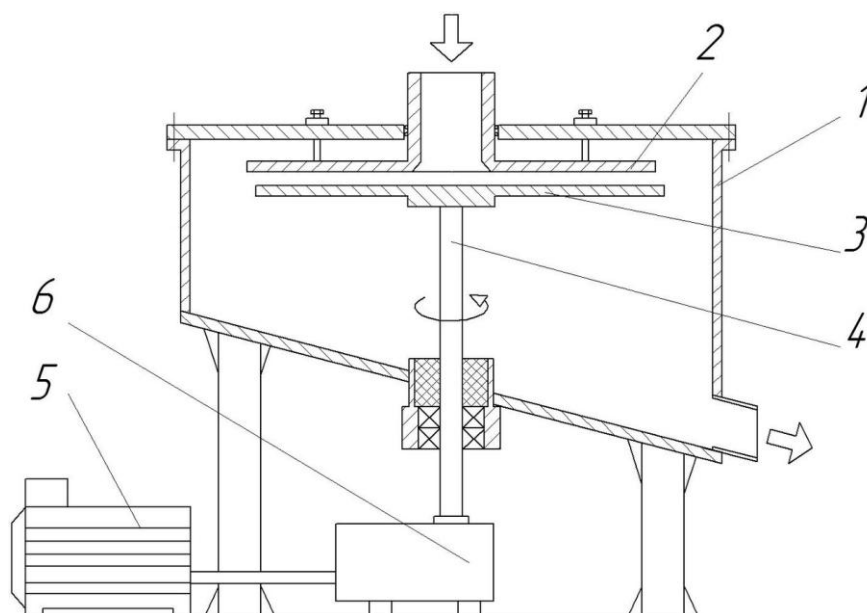


Рисунок 2.4 – Схема лабораторного млина: 1 – корпус; 2 – нерухомий диск; 3 – рухомий диск; 4 – приводний вал; 5 – електродвигун; 6 – редуктор

Стиснене повітря захоплює суспензію і розпилює її в шар гранул, утворюючи в ньому порожнину, куди і подається розпил. Таким чином, киплячий шар розділяється на дві зони: основна, де відбувається сушіння гранул, і зона зрошення, де гранули покриваються шаром суспензії (рис. 2.5).

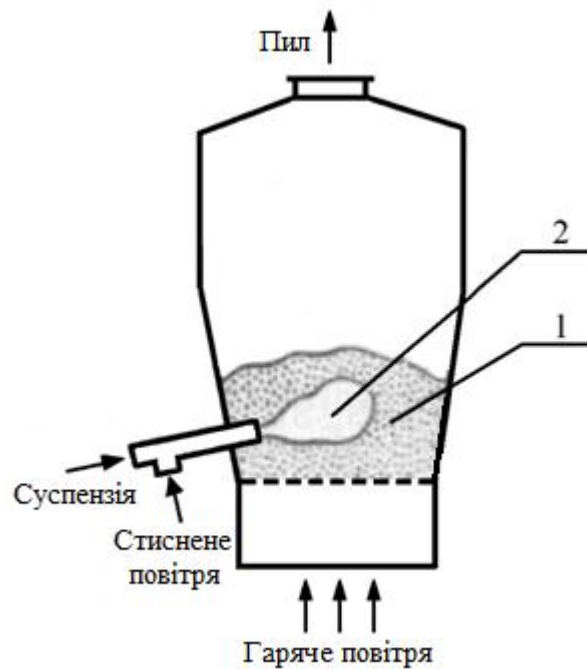


Рисунок 2.5 – Схема і потоки апарату киплячого шару: 1 – зона сушіння гранул;
2 – зона зрошення

До верхньої частини продуктової камери за допомогою фланцевого з'єднання прикріплена кришка 3, діаметр якої приблизно удвічі більший за діаметр камери 1. Таке різке розширення поперечного перерізу апарату призводить до зменшення швидкості газового потоку, тобто простір всередині кришки є сепараційною зоною. Ці заходи забезпечують мінімізацію унесення гранул відпрацьованим повітрям. Однак деякі краплі суспензії разом з повітрям виносяться за межі апарату, а рідкий курячий послід має дуже специфічний і неприємний запах. Для вирішення цієї проблеми відпрацьоване повітря за допомогою гофри 9 направляється до лабораторного витяжного пристрою (на схемі не показаний).

2.4 Методики дослідження гідравлічних закономірностей, теплообміну та кінетики росту частинок під час капсулювання гранул

Схема експериментальної установки, на якій проводились дослідження, зображена на рисунку 2.2.

Методика дослідження гідравлічних закономірностей процесу капсулювання. Попередньо, вихідну навіску гранул карбаміду зважували на електронній вазі Momet-6000 з точністю 0,1 г та завантажували у продуктову камеру 1. Включали газодувку 7 і за допомогою регулюючого вентиля встановлювали чотири різні витрати повітря крізь шар досліджуваних гранул. За показниками анемометра АСО-3 визначали швидкість зріджуючого повітря, яка відповідно дорівнювала 2,8; 3,5; 4,8; 5,6 м/с. Втрати тиску фіксували за допомогою U-подібного манометра.

Вприскування рідкої фази, у вигляді рідкого курячого посліду, в киплячий шар мінеральних гранул призводить до зміни гідродинамічних параметрів роботи апарату – гідравлічний опір шару збільшується пропорційно кількості введеної суспензії. Дослідження проводили при чотирьох постійних (для кожного випадку) витратах суспензії: 10; 13,5; 20; 25 мл/хв.

Отримані експериментальні результати представляли у вигляді залежності безрозмірних величин:

$$\frac{\Delta P_{\Sigma}}{\Delta P_C} = f\left(\frac{l_{\text{шт}}}{g_{\text{шт}}}\right), \quad (2.1)$$

де ΔP_C – опір сухої газорозподільної решітки, Па;

ΔP_{Σ} – сумарний опір шару матеріалу, зрошеного суспензією, та газорозподільної решітки, Па;

$l_{\text{шт}} = \frac{G_C}{S}$ – питома витрата органічної суспензії, кг/(с·м²);

$g_{\text{пит}} = \frac{G_{\text{п}}}{S}$ – питома витрата зріджуючого повітря, $\text{кг}/(\text{с}\cdot\text{м}^2)$;

S – площа поперечного перерізу апарата, м^2 ;

$G_{\text{с}}$, $G_{\text{п}}$ – відповідно масова витрата органічної суспензії та зріджуючого повітря, $\text{кг}/\text{с}$.

Як це видно з рівняння (2.1), отримані результати співставлялися зі значеннями гідравлічного опору сухої газорозподільної решітки. Для визначення останнього імпульсні трубки U-подібного манометра розташовували відповідно під газорозподільною решіткою та над нею. У цьому випадку дослідження проводили без навантаження по суспензії та без завантаження гранульованого матеріалу.

Методика дослідження теплообміну процесу капсулювання.

Вимірювання температури в зернистому шарі апарату здійснювалось за допомогою самописного потенціометра типу КСП-4 (точність вимірювання $\pm 0,5^\circ\text{C}$). Датчики термопар виконані у вигляді термометричних трубок діаметром 2 мм і довжиною 60 мм, на кінцях яких знаходиться спай з хромелевої та капелевої дротів діаметром 0,1 мм. Теплоємність даної термопару дуже мала, що дозволяє проводити вимірювання в умовах змінних температур протягом досліду. У кожному досліді також вимірювалися початкова та кінцева температури сушильного агента.

Розрахунок коефіцієнтів тепловіддачі проводили, використовуючи рівняння тепловіддачі, в якому теплове навантаження визначали за рівняннями теплового балансу (рисунок 2.6).

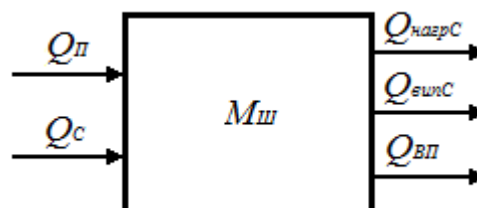


Рисунок 2.6 – Схема теплових потоків

Тепловий баланс періодичного процесу капсулювання складається зі статей, що наведені в таблиці 2.3.

Таблиця 2.3 – Статті теплового балансу

Прихід тепла		Витрата тепла	
Тепловий потік, що вноситься в систему гарячим повітрям	Q_{Π}	Тепловий потік, витрачений на нагрів суспензії до температури шару гранул	$Q_{нагрC}$
		Тепловий потік, витрачений на випаровування суспензії	$Q_{випC}$
Тепловий потік, що вноситься в систему з розчином органічної суспензії	Q_C	Тепло, що виноситься з потоком відпрацьованого повітря	$Q_{ВП}$
		Теплові втрати в навколишнє середовище	$Q_{ВТР}$

Оскільки в експериментальних умовах даної роботи критерій Біо знаходиться в межах $0,15 < Bi < 0,3$ і згідно рекомендацій [78] задачу теплопереносу слід вважати зовнішньою, тобто коли температура частинки по об'єму однакова і весь термічний опір зосереджено зовні частинки.

Складну для визначення величину поверхні теплообміну гранул визначали як питому поверхню частинок, що припадає на масу шару:

$$F = \frac{6}{\rho_{ГР} \cdot D}, \quad (2.2)$$

де $\rho_{ГР}$ – щільність гранул, $кг/м^3$;

D – середньозважений діаметр частинок, $м$.

Згідно вищевикладеного та враховуючи, що температура шару вимірювалася відкритими спаями термопар, які фіксували проміжне значення між температурами твердих частинок і сушильного агента, розраховані

значення коефіцієнтів тепловіддачі є не істинними, а «ефективними». Дослідні дані представляли згідно традиційним рекомендаціям у вигляді залежності $Nu = f(Re, Pr)$. Оскільки абсолютні значення швидкостей твердих частинок малі в порівнянні з швидкістю сушильного агента, а співвідношення між швидкістю газового потоку у вільному перерізі апарата і швидкістю потоку в шарі між частинками змінюється як по перетину, так і по висоті шару, та сильно залежить від гідродинамічного режиму зважування твердої фази, то при визначенні критерію Рейнольдса враховували усереднену швидкість сушильного агента.

Методика дослідження кінетики росту гранул у киплячому шарі. Експериментальні дослідження укрупнення полідисперсних гранул здійснювалися при одноразовому завантаженні гранульованого матеріалу і двох постійних подачах суспензії: 10 та 20 мл/хв відповідно. Тривалість процесу в обох випадках складала 60 хвилин.

Для визначення гранулометричного складу карбаміду попередньо проводився ситовий аналіз: матеріал завантажувався на сито з отворами діаметром 3,5 мм і шляхом вібрації поділявся на дві частини – залишок та прохід. Прохід, у свою чергу, завантажувався на наступні сита у порядку зменшення діаметру отворів (3 мм; 2,5 мм; 2 мм; 1,5 мм; 1 мм). Після закінчення просіву кожна отримана фракція зважувалася. У такий спосіб навіска гранул карбаміду пофракційно розподілялася за розмірами. До процесу залучалися гранули з мінімальним діаметром 1,5 мм.

Відтак, полідисперсна навіска карбаміду в кількості 0,5 кг подавалася на газорозподільну решітку 2. Як і в попередньому випадку, зважування вихідних гранул здійснювали на електронній вазі Momert-6000 (точність $\pm 0,1$ г). Послідовно запускали газодувку 7 і вмикали калорифер 8. Для дослідження встановлювали необхідну швидкість висхідного потоку повітря, завдяки якому створювався киплячий шар. За допомогою пневматичної форсунки 4 у шар зважених гранул відбувалося вприскування рідкого курячого посліду в кількості 10 мл/хв.

Через кожні 20 хвилин тривалості процесу лабораторна установка вимикалася і проводився ситовий аналіз гранул. Потім установка запускалась і експеримент продовжувався: тобто для кожного послідуочого 20-хвилинного процесу вихідним продуктом, який завантажувався у продуктову камеру 1, були кінцеві гранули попереднього експерименту.

Аналогічні випробування проводилися при збільшених навантаженнях по суспензії (20 мл/хв).

Також проводилися дослідження кінетики росту монодисперсного шару. Для цього використовували гранули карбаміду діаметром $D \approx 2$ мм, на які, як і в попередніх експериментах, наносили суспензію курячого посліду при відповідних режимно-технологічних параметрах. Тривалість капсулювання складала 50 хвилин. Процес проводили при одноразовому завантаженні гранульованого матеріалу і двох постійних подачах органічної суспензії: в першому випадку – 10 мл/хв, а в другому – 20 мл/хв. До початку експерименту та кожні 10 хвилин тривалості процесу капсулювання з шару відбирали по 25 частинок, які зважували на аналітичних вагах. За різницею масових результатів і визначали збільшення товщини органічної оболонки.

2.5 Методика дослідження структури гранул

Підготовка гранул для дослідження їх структури включала наступні етапи. Спочатку скляну поверхню ретельно натерали воском. Далі на цю поверхню встановлювали та фіксували форму, яка являє собою трубу $\varnothing 25 \times 2,5$ мм та довжиною 15-20 мм. Отже, скляна поверхня і труба утворювали ємність, до якої завантажували по 8-10 досліджуваних гранул та заливали епоксидним клеєм. Клей готували шляхом змішування епоксидної смоли з отверджувачем у пропорції 1:10. Вкрай важливо, щоб усі гранули розташовувалися в одній площині, тобто прилягали до скла.

Давали можливість клею застигнути (1-2 дні), після чого, завдяки наявності воскової прошарки, форма легко відокремлювалася від скла. Таким

чином труба, гранули та епоксидний клей утворювали єдину нерозривну систему, яку сточували на шліфувальному верстаті поки не отримували якісні зрізи гранул. Дослідження структури зрізів органо-мінеральних гранул проводили за допомогою мікроскопа.

2.6 Методика дослідження проникності оболонки

Нанесена на поверхню мінеральних гранул однокомпонентна товста оболонка створює додатковий опір масоперенесенню в процесі розчинення добрив, тобто мінімізуються непродуктивні втрати елементів живлення. Отже, отримане таким чином органо-мінеральне добриво має пролонговану дію і більш продуктивно живить рослину протягом тривалого часу, а завдяки органічному походженню матеріалу оболонки його використання не забруднює ґрунт та підземні води.

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 [103].

Динаміку вивільнення цільового компонента (азоту) визначали на спеціально створеній установці (рисунок 2.7).

Методика проведення досліджень полягала в наступному. Відбирали навіску, отриманих в лабораторних умовах, органо-мінеральних гранул з часткою органічної оболонки 50 % мас. у кількості $10 \pm 0,1$ г та завантажували в перфоровану ємність 2. Останню клали на дно прозорої ємності 1, в яку наливали 500 мл дистильованої води. Для запобігання випаровування рідини всю цю систему закривали кришкою 3. Для забезпечення рівномірного перемішування рідини використовувалась лопатева мішалка 4. Температура води в ємності 1 підтримувалась на рівні 25°C. Кількість азоту, що вивільняється і розчиняється у воді, визначали кондуктометричним методом.

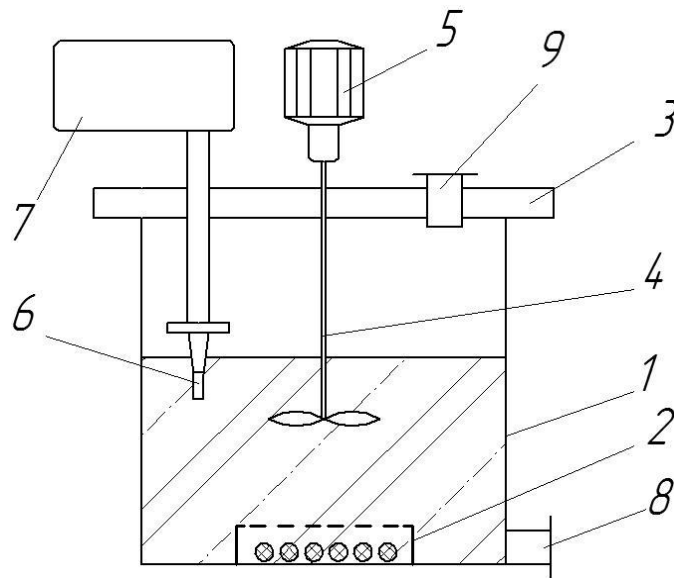


Рисунок 2.7 – Лабораторна установка для дослідження проникності органічної оболонки: 1 – прозора ємність; 2 – перфорована ємність для гранул; 3 – кришка; 4 – лопатева мішалка; 5 – двигун; 6 – електрод кондуктометра; 7 – перетворювач кондуктометра; 8 – патрубок для зливу рідини; 9 – патрубок для наливання рідини

Першу пробу знімали через 24 години від початку розчинення. Подальший аналіз результатів, відповідно до європейської норми EN 13266:2001 [104], проводили через 7, 14, 21, 28, 56, 84 та 112 днів.

Максимально можливу концентрацію цільового компонента у воді визначали наступним чином. Попередньо 10 г досліджуваних гранул ретельно подрібнювали. Отриманий порошок заливали дистильованою водою в зазначеній кількості. Закривали все це кришкою, включали перемішувач пристрій і проводили розчинення впродовж однієї доби. В отриманому розчині, за допомогою портативного кондуктометра (Додаток А), визначали концентрацію азоту.

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

$$x_i = \frac{C_i}{C_\Sigma} \cdot 100, \quad (2.3)$$

де C_i – поточна концентрація цільового компонента у воді, *мг/л*;

C_{Σ} – максимально можлива концентрація цільового компонента у воді, *мг/л*.

2.7 Методика визначення статичної міцності гранул

Нанесена на поверхню мінеральних гранул органічна оболонка у вигляді сухого курячого посліду модифікує їх у продукт з новими фізико-хімічними властивостями. Речовина, що використовується в якості оболонки повинна забезпечувати не лише дозоване постачання поживних елементів у ґрунт, але й підвищувати міцність гранул, щоб попередити їх руйнування під час транспортування та внесення.

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 [105]. Усі гранули послідовно руйнували на лабораторному пристрої (рисунок 2.8) і за шкалою вимірювали силу.

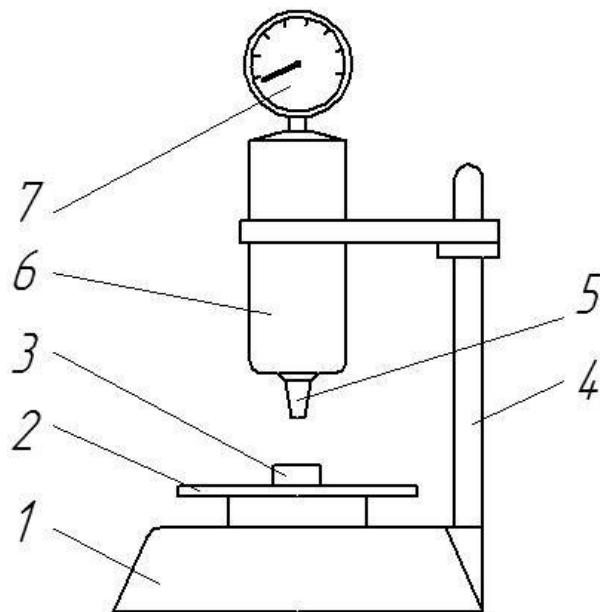


Рисунок 2.8 – Схема приладу для визначення статичної міцності гранул:

1 – опорна плита; 2 – обертова площадка; 3 – перехідник; 4 – рама; 5 – щуп; 6 – корпус; 7 – вимірювальна шкала

Дослідження проводили наступним чином. Випробовувану гранулу розміщували між перехідником 3 і торцем щупа 5. Попередньо необхідно скинути налаштування щупа, повернувши його у вихідне положення. Після цього починаємо обертати площадку 2, яка тисне на гранулу і на щуп відповідно. Величину відхилення останнього фіксуємо за допомогою шкали 7.

На певному етапі обертання гранула руйнується і на вимірювальній шкалі відображається критичне значення прикладеної сили.

Аналогічні дослідження проводили для усіх відібраних гранул.

Статичну міцність гранул X , МПа обчислювали за формулою [105]:

$$X = \frac{\sum_{i=1}^{i=20} P_i}{20 \cdot S_1} = \frac{\sum_{i=1}^{i=20} P_i}{20 \cdot \frac{\pi \cdot D_{CEP}^2}{4}}, \quad (2.4)$$

де P_i – сила, яка необхідна для руйнування однієї гранули, Н;

S_1 – площа поперечного перерізу гранули, $см^2$;

D_{CEP} – середній діаметр гранул, $см$.

2.8 Оцінка похибок вимірювання

Для вимірювання геометричних розмірів (діаметра) окремих гранул використовували штангенциркуль 0 – 125 мм. Вага гранул вимірювалась за допомогою: до 200 г – аналітичної та електронної М-200 ваги (точність 0,0001 г та 0,01 г відповідно); до 500 г – електронної ваги Momert-6000 (точність 0,1 г). Для вимірювання часу застосовували електронний секундомір КК-5853, з точністю вимірювання 0,01 с.

Відносну вологість вимірювали за допомогою аналітичного аналізатора Ohaus MB 25 (точність 0,1), перепад тиску – за допомогою U-подібного манометра.

Для вимірювання швидкості повітря застосовували крильчастий механічний анемометр АСО-3 (точність вимірювання $\pm 0,1$ м/с).

Середньоквадратичне відхилення розрахункових значень від експериментально отриманих визначали за формулою [106]:

$$S = \sqrt{\frac{\sum (X^2 - \bar{X}^2)}{n-1}}, \quad (2.5)$$

де X – розраховане значення;

\bar{X} – усереднене експериментальне значення;

n – кількість вимірювань.

Абсолютне значення відносної похибки між розрахунковими та експериментальними значеннями визначали за формулою [107]:

$$\Delta = \left| \frac{X_E - X_T}{X_E} \right|, \quad (2.6)$$

де X_E – експериментальні значення;

X_T – теоретичні (розрахункові) значення.

Граничні значення похибок прямих вимірювань використовуваних приладів приведені в таблиці 2.4.

Таблиця 2.4 – Граничні значення похибок прямих вимірювань

Параметр	Позначення	Одиниці вимір.	Прилад	Похибка	
				абсолютна	відносна
1	2	3	4	5	6
Діаметр гранул	D	мм	Штангенциркуль	$1 \cdot 10^{-1}$	$1 \cdot 10^{-2}$

Продовження таблиці 2.4

1	2	3	4	5	6
Об'єм	V	m^3	Мірний циліндр	$1 \cdot 10^{-9}$	$1 \cdot 10^{-12}$
Вага	G	Kg	Аналітична	$1 \cdot 10^{-7}$	$5 \cdot 10^{-10}$
			Електронна М-200	$1 \cdot 10^{-5}$	$5 \cdot 10^{-9}$
			Електронна Momet-6000	$1 \cdot 10^{-4}$	$5 \cdot 10^{-7}$
Перепад тисків	ΔP	<i>мм.вод.ст.</i>	U-подібний манометр	1	$4 \cdot 10^{-3}$
Температура	t	$^{\circ}C$	Потенціометр КСП-4	0,5	$5 \cdot 10^{-3}$
Відносна вологість	φ	%	Ohaus MB 25	$1 \cdot 10^{-1}$	$1 \cdot 10^{-2}$
Швидкість повітря	w	<i>м/с</i>	Анемометр АСО-3	$1 \cdot 10^{-1}$	$1 \cdot 10^{-2}$
Час	τ	C	Електронний секундомір КК-5853	$1 \cdot 10^{-2}$	$5 \cdot 10^{-6}$

Висновки до другого розділу

1. Обґрунтовано вибір об'єктів дослідження та надано їх основні характеристики.
2. Розроблено експериментальну установку для проведення досліджень.
3. Розроблено та обґрунтовано методики дослідження гідродинаміки, зовнішнього теплообміну та кінетики укрупнення частинок під час капсулювання мінеральних гранул у киплячому шарі.

4. Розроблено та обґрунтовано методику дослідження структури капсульованих гранул.
5. Наведено методики визначення статичної міцності гранул та дослідження проникності захисної органічної оболонки.

Основні результати опубліковано в наступних працях [108, 109].

РОЗДІЛ 3

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ ПОКРИТТЯ МІНЕРАЛЬНИХ ГРАНУЛ ОРГАНІЧНОЮ СУСПЕНЗІЄЮ

3.1 Фізична модель процесу покриття гранул мінеральних добрив органічною суспензією

Особливістю використання в якості 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 неоднозначний і істотно залежить від специфіки суспензії та режиму процесу капсулювання, що визначають характер взаємодії диспергованої суспензії з дисперсною твердою фазою.

На газорозподільній решітці в киплячому стані знаходиться шар мінеральних гранул. Тобто, гранули не лежать на решітці, а завдяки висхідному потоку газу як би киплять – перебувають у постійному хаотичному русі: то опускаючись ближче до решітки, то піднімаючись вгору, переміщуючись при цьому і в поперечному напрямку. Відбувається так зване поздовжньо-поперечне перемішування. Потік гарячого повітря, що йде знизу, гарантовано обдуває кожну гранулу.

Специфіка киплячого шару при капсулюванні складається з багаторазового змінення температури на поверхні гранул. На прикладі однієї гранули це відбувається наступним чином. У прирешіточній зоні гранула обдувається гарячим повітрям і має температуру, близьку до температури повітря. Для забезпечення усталеного киплячого шару необхідно виконання умови пневмотранспорту гранули (рисунок 3.1): тобто сила земного тяжіння гранули ($m \cdot g$) врівноважується силою, яку прикладає повітря до її поверхні (F_{II}), та архімедовою силою (F_A).

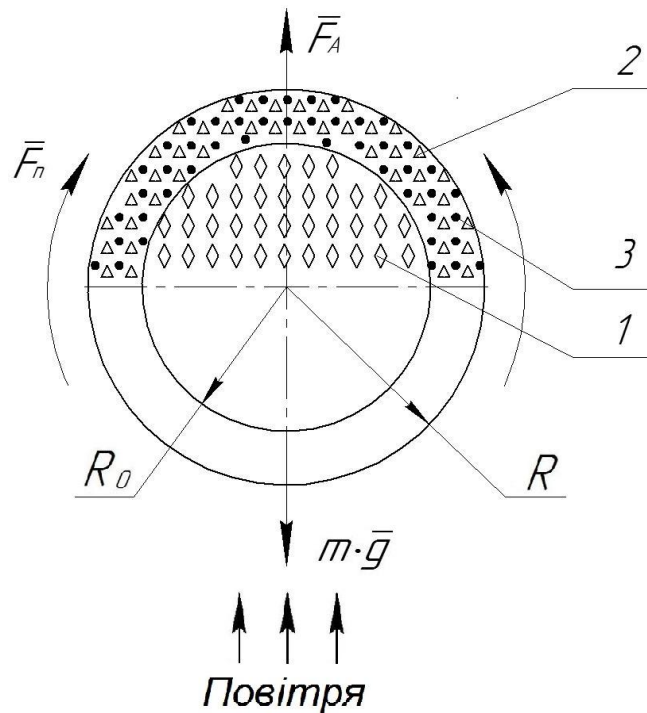


Рисунок 3.1 – Схема взаємодії мінеральної частинки, покритої органічною суспензією, з повітрям: 1 – мінеральна речовина; 2 – суха органічна речовина; 3 – волога; R_0, R – початковий і поточний радіуси частинки відповідно; F_n – сила лобового опору; $m \cdot g$ – сила земного тяжіння; F_A – сила Архімеда

Потім гранула потрапляє в зону зрошення, де в більшій або меншій мірі покривається шаром суспензії (рисунок 3.2, б) – це супроводжується різким зниженням її температури. Гранула стає важкою і знову опускається у прирешіточну зону (зону сушки), де контактує з потоком гарячого повітря – відбувається «вибухове» (інтенсивне) випаровування рідини. Вода або розчин випаровується, а на поверхні мінеральної гранули утворюється шар сухої органічної речовини (рисунок 3.2, в), збільшуючи завдяки цьому об'єм та діаметр гранули. А це, в свою чергу, призводить до зміни гідродинамічних параметрів роботи апарату. Далі процес повторюється.

Нарощування значного шару оболонки відбувається протягом багатьох таких циклів (рисунок 3.2, г).

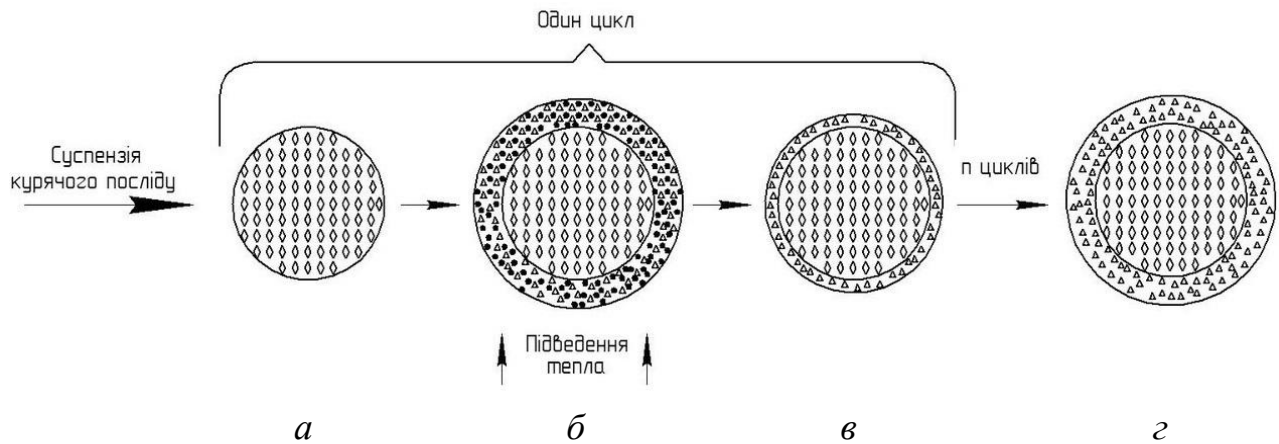


Рисунок 3.2 – Механізм утворення органо-мінеральних добрив

3.2 Режимні параметри нанесення суспензії курячого посліду на гранули мінеральних добрив

Найбільш вагомим фактором, що впливає на кінетику росту гранул, є характер взаємодії між краплями суспензії та мінеральними гранулами. Тобто швидкість дорощування гранул шаром органічної речовини залежить від сумірності двох факторів: часу розтікання краплі та інтенсивності тепло-масообміну (інтенсивності видалення рідкої фази суспензії).

При дуже швидкому підводі тепла рідина випаровується з краплі, яка ще не встигла розтектися по поверхні гранули. По мірі зменшення кількості тепла крапля розтікається по все більшій поверхні, доки не покриє всю гранулу. При нестачі тепла для випаровування краплі гранула залишається вологою, а це супроводжується тим, що волога починає дифундувати через прикордонний шар всередину ядра.

Таким чином, механізм росту гранул неоднозначний і істотно залежить від специфіки суспензії та режиму процесу капсулювання, що визначають характер взаємодії диспергованої суспензії з дисперсною твердою фазою.

Температура під решіткою регулюється в межах 50-100°C, при цьому температура в шарі гранул має дещо нижчі значення. Зниження температури в шарі є наслідком введення суспензії, яка, випаровуючись, відбирає тепло.

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

1) при температурі шару в межах 40-50°C крапля суспензії не розтікається по поверхні гранули, а закріплюється з однієї сторони гранули, утворюючи при висиханні міцний нарост, який за своїми розмірами відповідає розмірам краплі (рисунок 3.3, *а*);

2) при підвищенні температури шару до 60-65°C крапля суспензії розтікається по мінеральній поверхні гранули і починає інтенсивно випаровуватися рідина, утворюючи при висиханні тонкий міцний шар сухої органіки (рисунок 3.3, *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 ядра (рисунок 3.3, *в*).

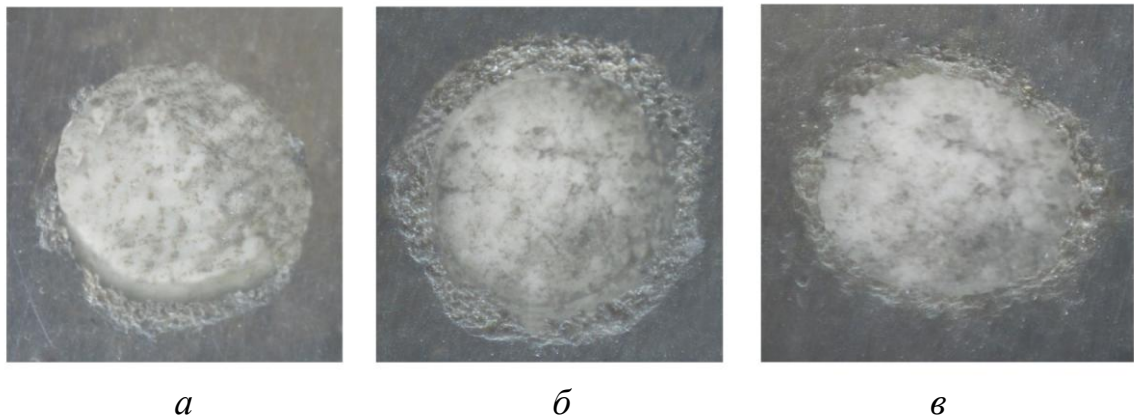


Рисунок 3.3 – Зрізи гранул карбаміду, покритих курячим послідом, що одержані при відповідному температурному режимі: *а* – однобічному (40-50°C); *б* – оболонковому (60-65°C); *в* – нерівномірному з тріщинами (70-80°C)

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.

Функціональне призначення покриття є визначальним у виборі матеріалу оболонки із певними фізико-хімічними характеристиками. Тому основним показником якісного покриття у випадку капсулювання гранульованих мінеральних добрив курячим послідом є рівномірно розподілена по всій поверхні гранули оболонка визначеної товщини, яка сприяє повному залученню мінеральних ядер в шар органічної речовини. Структура, отриманих в такий спосіб, органо-мінеральних гранул зображена на рисунку 3.4.

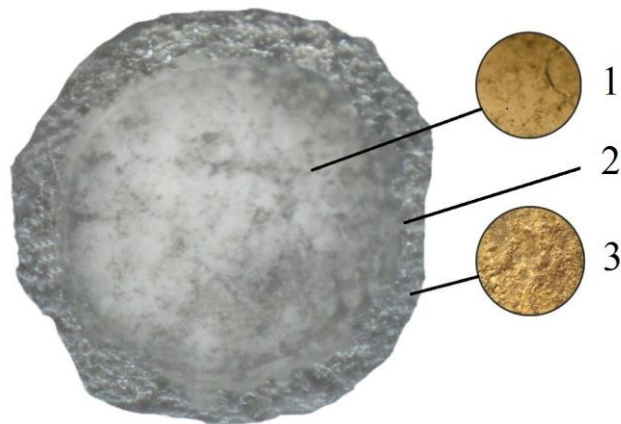


Рисунок 3.4 – Структура органо-мінеральних гранул: 1 – мінеральне ядро (карбамід); 2 – перехідна зона; 3 – суха органічна оболонка (курячий послід)

Таким чином, робочим є оболонковий режим, що дозволяє доростити всі гранули до товарного розміру (рисунок 3.5).



Рисунок 3.5 – Загальний вигляд органо-мінеральних гранул пролонгованої дії

Перехідна зона утворюється в місці зчеплення органічної речовини з мінеральною поверхнею і являє собою суміш карбаміду та курячого посліду. Товщина і структура цієї зони залежать від технологічних параметрів процесу.

Процес капсулювання гранул карбаміду курячим послідом в лабораторних умовах має раціональні режимно-технологічні параметри (таблиця 3.1).

Таблиця 3.1 – Режимно-технологічні параметри процесу капсулювання в апараті псевдозрідженого 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

3.3 Експериментальне дослідження гідравлічних закономірностей процесу капсулювання. Узагальнення результатів

Для узагальнення результатів визначали гідравлічні опори відповідно сухої газорозподільної решітки (рисунок 3.6) та зваженого шару гранул карбаміду (рисунок 3.7) за різної витрати зріджуючого повітря.

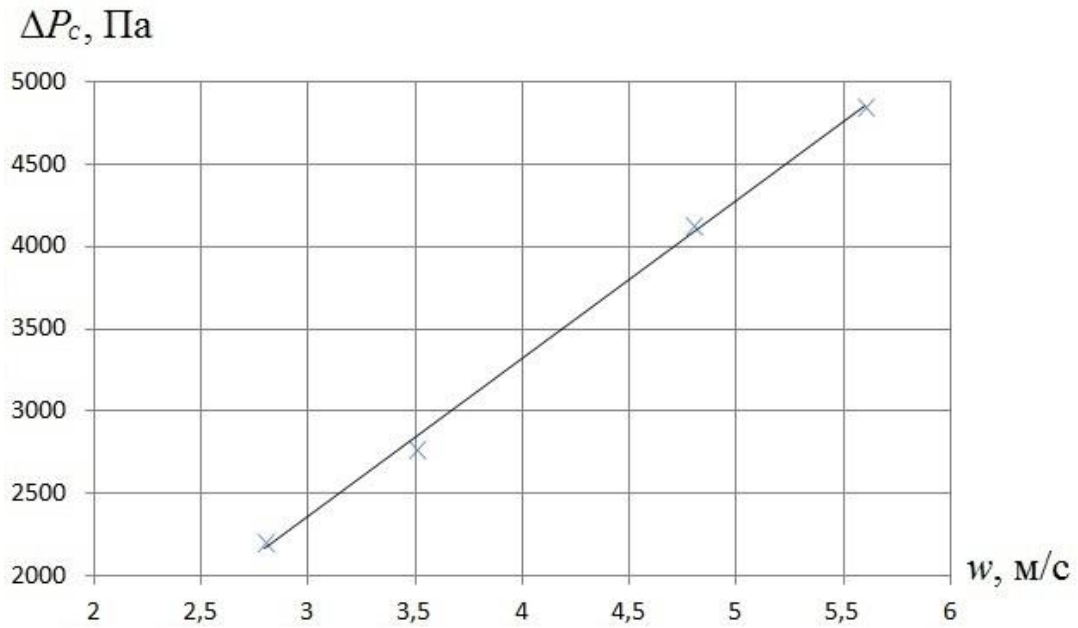


Рисунок 3.6 – Залежність опору сухої газорозподільної решітки ΔP_c від швидкості зріджуючого повітря w

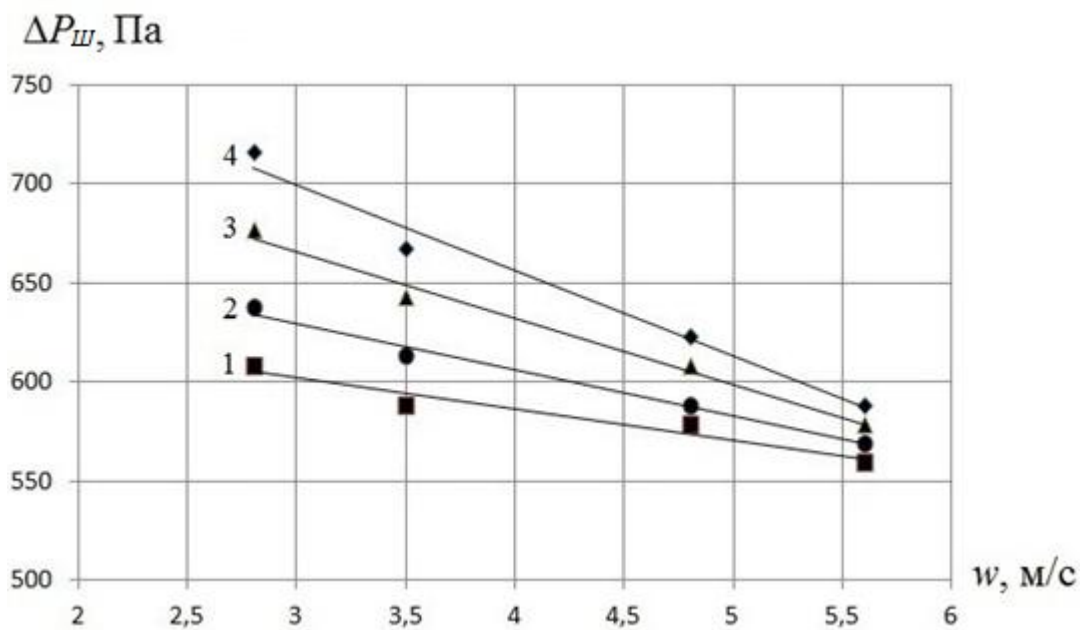


Рисунок 3.7 – Залежність опору шару гранул карбаміду $\Delta P_{ш}$ у стані псевдозрідження від швидкості зріджуючого повітря w при відповідній витраті суспензії курячого посліду G_c ($l_{штг}$):

1 – 10 мл/хв ($0,00657 \text{ кг}/(\text{с}\cdot\text{м}^2)$); 2 – 13,5 мл/хв ($0,00887 \text{ кг}/(\text{с}\cdot\text{м}^2)$); 3 – 20 мл/хв ($0,0131 \text{ кг}/(\text{с}\cdot\text{м}^2)$); 4 – 25 мл/хв ($0,0164 \text{ кг}/(\text{с}\cdot\text{м}^2)$)

Для визначення впливу суспензії курячого посліду на гідродинамічні параметри псевдозрідженого шару гранул карбаміду проводили аналіз експериментальних даних за рівнянням (2.1).

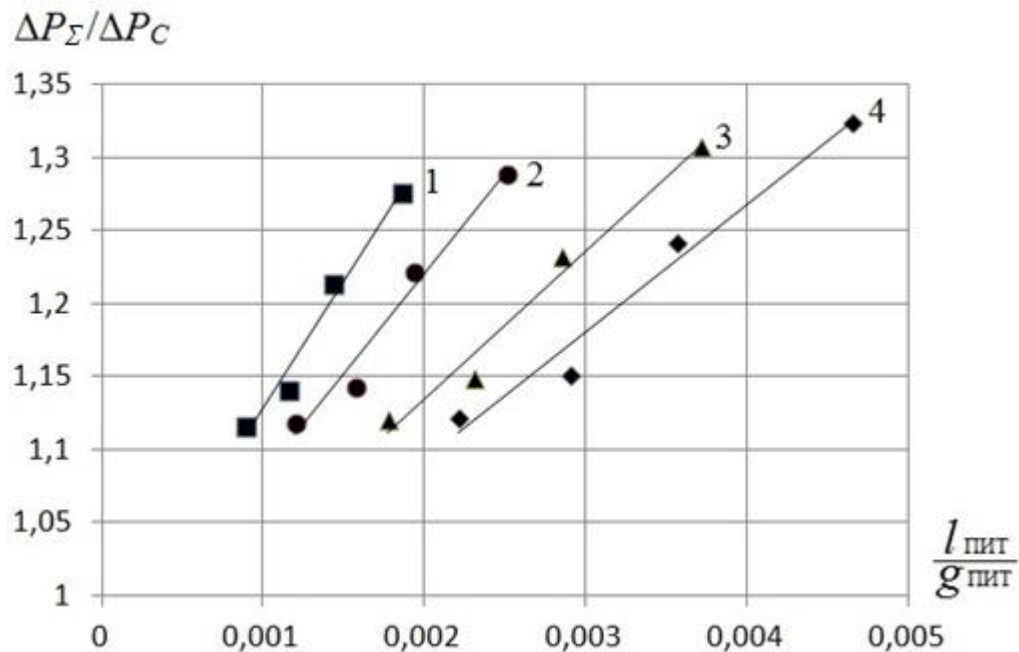


Рисунок 3.8 – Графічна залежність $\frac{\Delta P_{\Sigma}}{\Delta P_C} = f\left(\frac{l_{\text{ПИТ}}}{g_{\text{ПИТ}}}\right)$ при відповідній питомій

витраті суспензії курячого посліду $l_{\text{ПИТ}}$: 1 – 0,00657 кг/(с·м²); 2 – 0,00887

кг/(с·м²); 3 – 0,0131 кг/(с·м²); 4 – 0,0164 кг/(с·м²)

Залежність $\frac{\Delta P_{\Sigma}}{\Delta P_C} = f\left(\frac{l_{\text{ПИТ}}}{g_{\text{ПИТ}}}\right)$ вважаємо лінійною, тобто:

$$\frac{\Delta P_{\Sigma}}{\Delta P_C} = A \cdot \left(\frac{l_{\text{ПИТ}}}{g_{\text{ПИТ}}}\right) + B, \quad (3.1)$$

де A, B – емпіричні константи.

Значення констант A і B знаходимо, провівши апроксимацію експериментальних даних (таблиця 3.2).

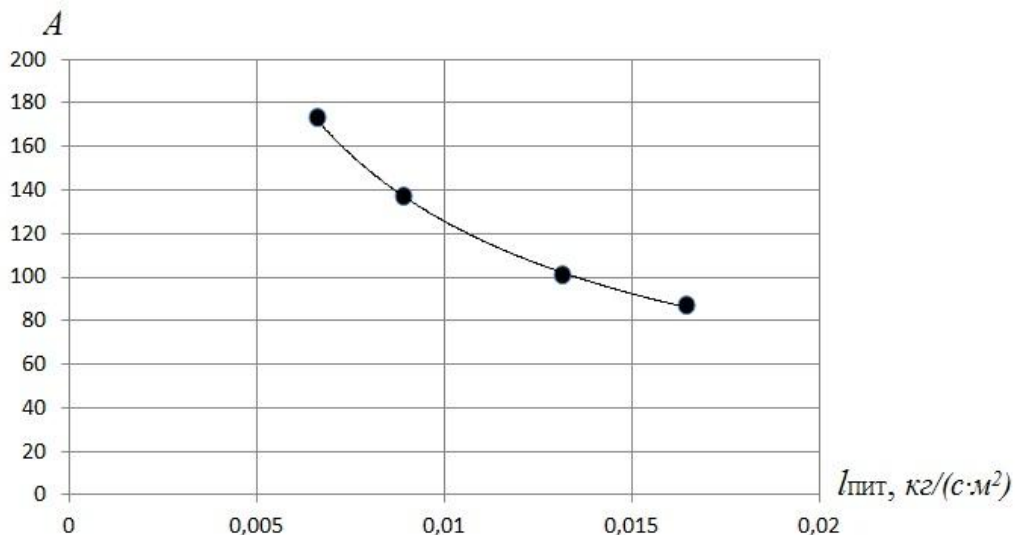
Таблиця 3.2 – Числові значення констант A і B

$l_{\text{пит}}, \text{кг}/(\text{с}\cdot\text{м}^2)$	A	B
0,00657	173,4	0,9547
0,00887	137,5	0,9511
0,0131	101,2	0,9495
0,0164	87,0	0,9489

Як це видно з таблиці 3.2, значення константи B при різних подачах органічної суспензії є приблизно однакова і дорівнює $B=0,95$.

Для узагальнення значень константи A будемо її графічну залежність від питомої витрати суспензії $l_{\text{пит}}$ (рисунок 3.9), яка найкраще апроксимується наступною ступеневою залежністю:

$$A = 3,8 \cdot l_{\text{пит}}^{-0,76}. \quad (3.2)$$

Рисунок 3.9 – Залежність константи A від питомої витрати суспензії $l_{\text{пит}}$

Підставивши (3.2) в рівняння (3.1) та з урахуванням значення константи B , отримуємо рівняння для прогнозування зміни гідравлічного опору

киплячого шару матеріалу при його зрошенні в залежності від питомих витрат органічної суспензії та зріджуючого повітря:

$$\frac{\Delta P_{\Sigma}}{\Delta P_C} = 3,8 \cdot l_{\text{ПИТ}}^{-0,76} \cdot \left(\frac{l_{\text{ПИТ}}}{g_{\text{ПИТ}}} \right) + 0,95. \quad (3.3)$$

3.4 Експериментальне дослідження кінетики росту гранул у киплячому шарі. Узагальнення результатів

У результаті проведення ситового аналізу полідисперсна навеска гранул карбаміду розділилася за розміром на відповідні фракції (таблиця 3.3).

Таблиця 3.3 – Гранулометричний склад карбаміду

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

Пил та дуже дрібні гранули ($D < 1,5$ мм) відсівалися, а отже до процесу залучалися частинки з мінімальним розміром $D = 1,5$ мм. Ситовий аналіз вихідного матеріалу показав, що для полідисперсної суміші гранульованого карбаміду, отриманого способом обкочування в барабані, характер залежності розподілу часток за розмірами є бімодальним, тобто має два характерних максимуми (рисунок 3.10): менший із них, вміст яких складає 11,9 %, знаходиться в діапазоні досить великих гранул діаметром порядку $D = 3 - 3,5$ мм, а більший із вмістом 75,2 % – $D = 2 - 2,5$ мм. Це підтверджує динамічну рівновагу системи, у якій протікають процеси, спрямовані на збільшення розмірів часток – нормальне зростання, а також зворотні процеси – за рахунок стирання поверхні гранул, при їх інтенсивному обкочуванні, в барабані йде утворення нових центрів грануляції, що збільшує частку дрібних гранул в суміші [62].

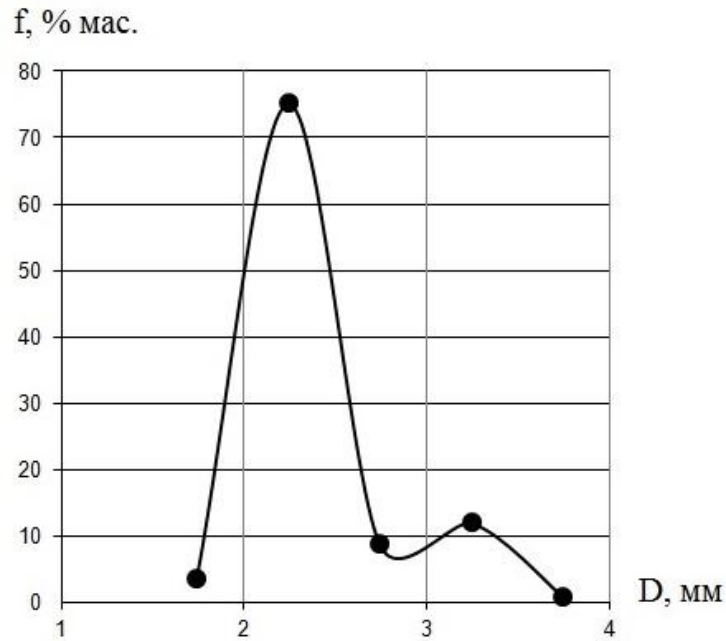


Рисунок 3.10 – Розподіл частинок за розмірами вихідних гранул карбаміду

Результати дослідів кінетики укрупнення гранул карбаміду при їх капсулюванні у киплячому шарі для періодичного режиму роботи апарата приведені на рисунках 3.11 – 3.13 та в Додатку В.

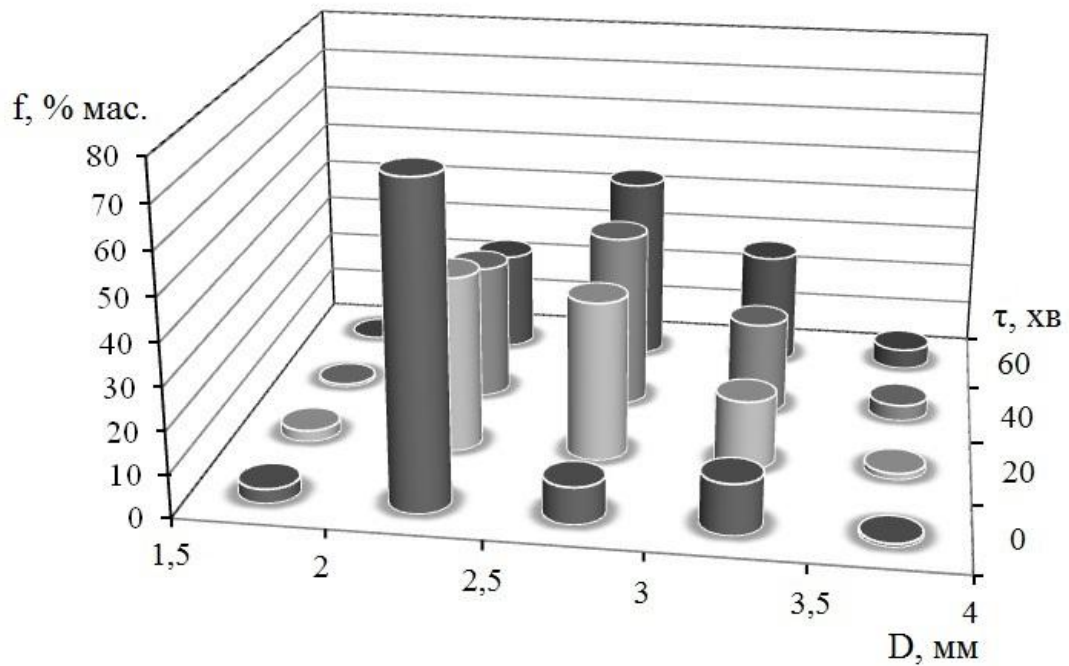


Рисунок 3.11 – Гістограми розподілу частинок за розмірами в різні моменти часу протягом процесу капсулювання при витраті суспензії 10 мл/хв

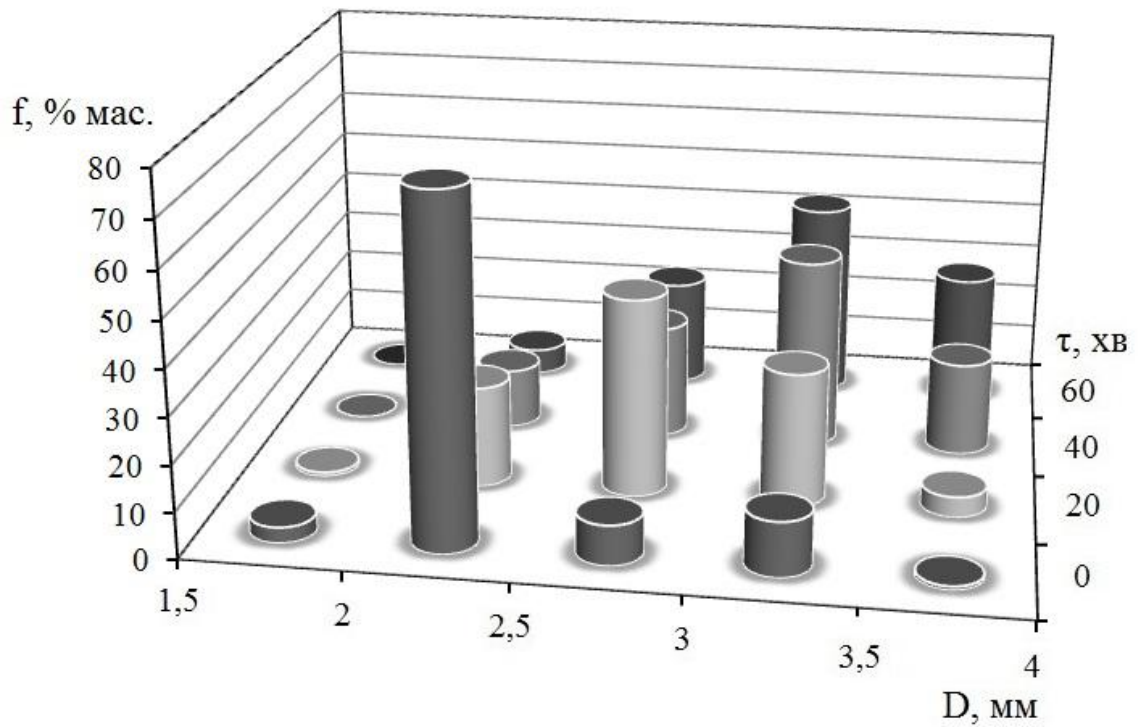


Рисунок 3.12 – Гістограми розподілу частинок за розмірами в різні моменти часу протягом процесу капсулювання при витраті суспензії 20 мл/хв

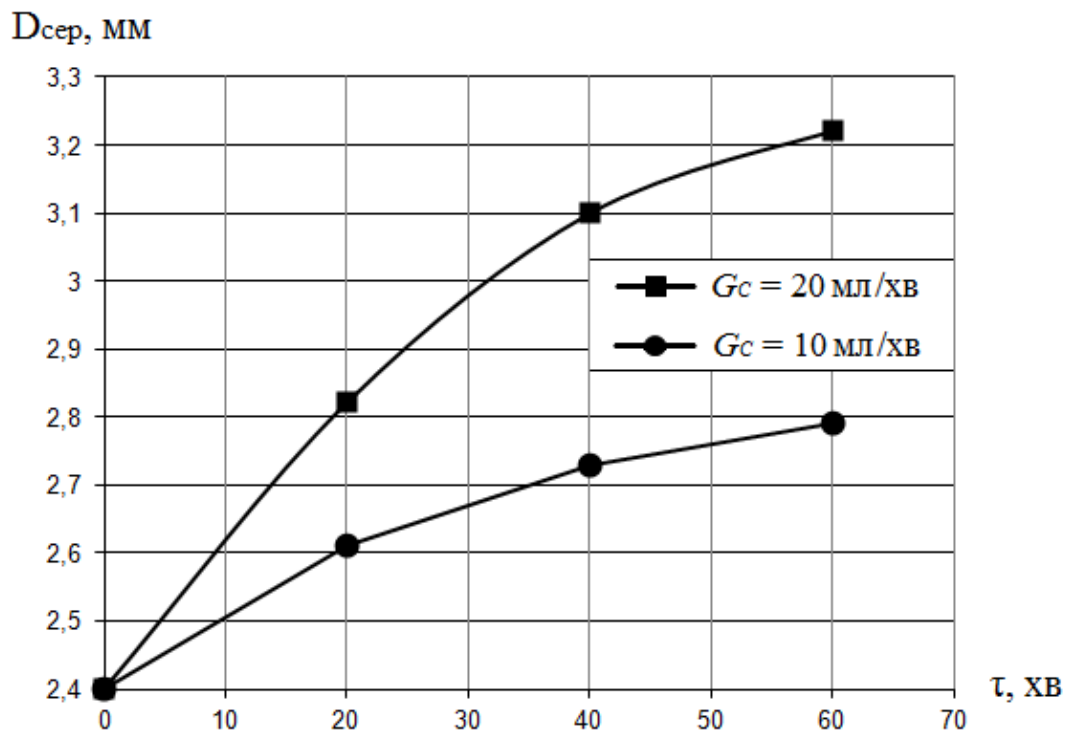


Рисунок 3.13 – Змінення середньозваженого діаметра частинок протягом процесу капсулювання при відповідних витратах суспензії G_C

У даному випадку середньозважений діаметр визначали за залежністю:

$$D_{СЕР} = \sum D_i \cdot x_i, \quad (3.4)$$

де D_i , x_i – відповідно діаметр та масовий вміст гранул i -ої фракції.

У процесі капсулювання, крива розподілу змінює свою форму і має один максимум (рисунок 3.14). Це означає, що при робочих умовах капсулювання органічна речовина закріплюється на поверхні часток міцним шаром і не відбувається її сколювання в окремих місцях гранули.

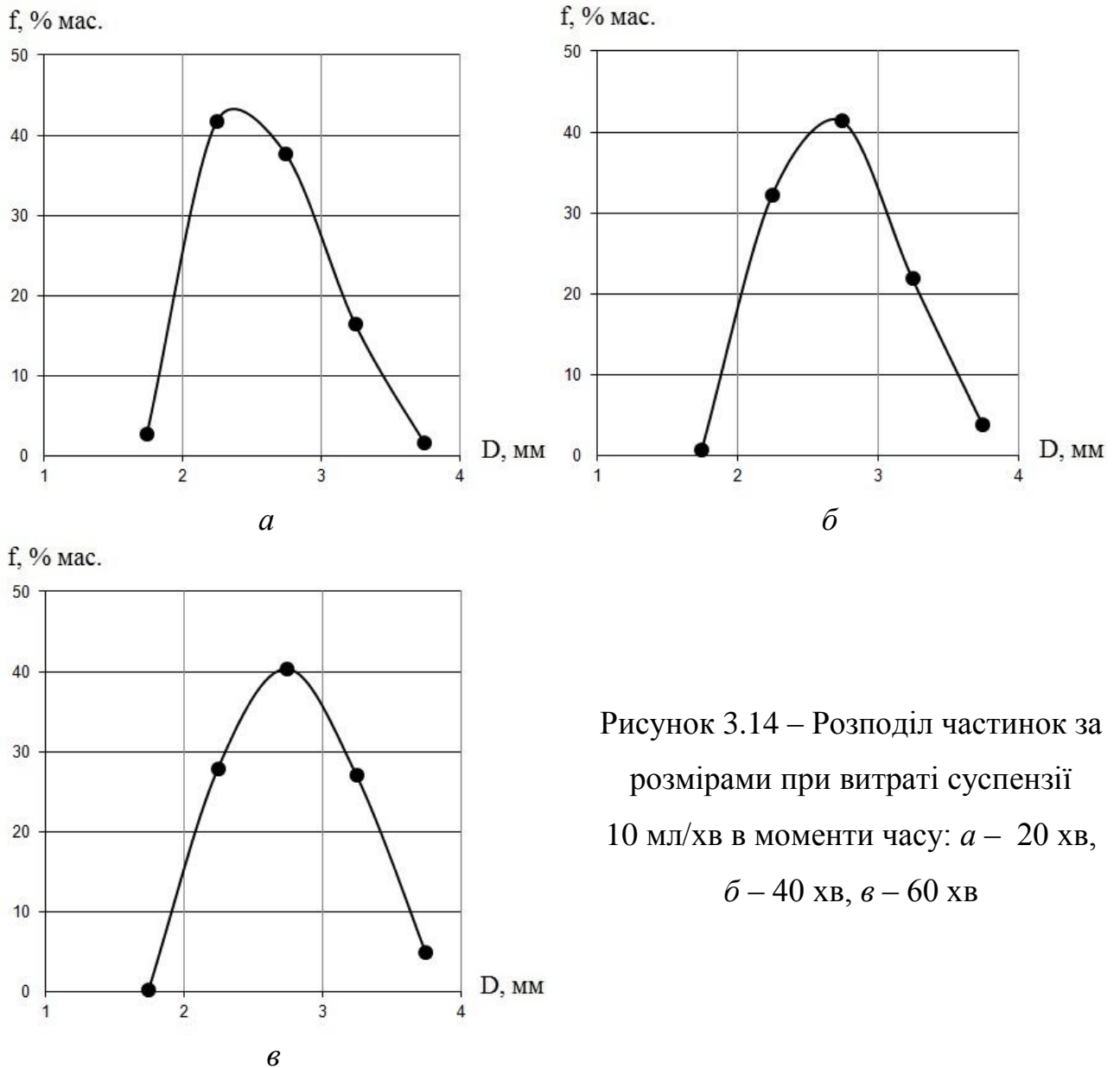


Рисунок 3.14 – Розподіл частинок за розмірами при витраті суспензії 10 мл/хв в моменти часу: *a* – 20 хв, *б* – 40 хв, *в* – 60 хв

Наявність одного максимуму, щодо кривої розподілу, спостерігаються і при збільшенні навантаження по суспензії (рисунок 3.15).

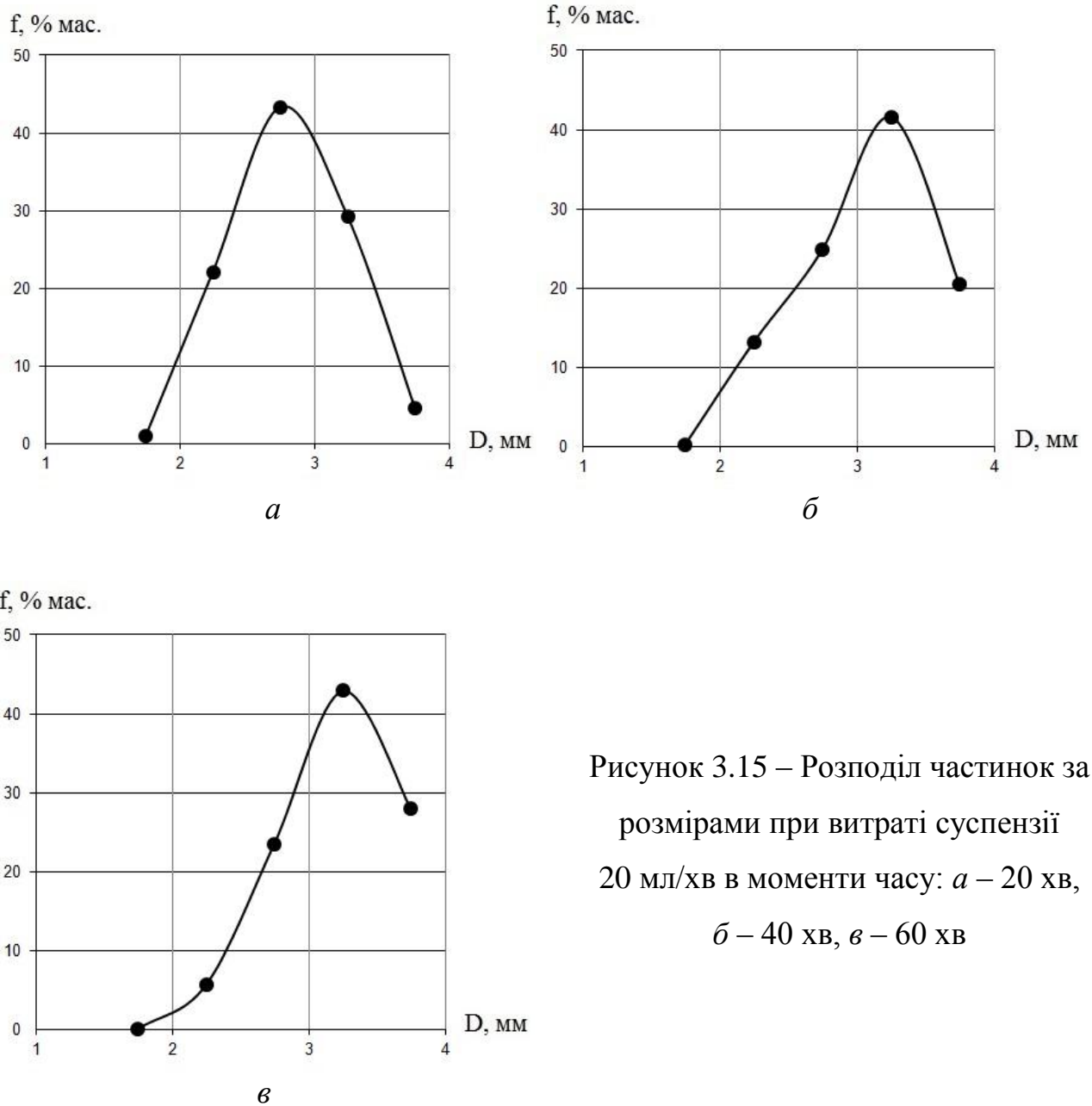


Рисунок 3.15 – Розподіл частинок за розмірами при витраті суспензії 20 мл/хв в моменти часу: *a* – 20 хв, *б* – 40 хв, *в* – 60 хв

Таким чином, процес дорощування гранул карбаміду курячим послідом протікає без нових центрів гранулоутворення, тобто не відбувається генерації всередині системи, так званого, внутрішнього рециклу.

Гістограми розподілу частинок за розмірами (рисунок 3.11, 3.12) та аналогічні залежності (рисунок 3.14, 3.15) показують, що в процесі

капсулювання максимум функції зміщується убік збільшення розміру гранул порядку. Незважаючи на зменшення вмісту таких частинок, характер залежності є більш пологим, тобто в середньому охоплює більш розширену область розмірів гранул (1,8 - 3,8 мм) порівняно з більш вузьким піком (рисунок 3.10), який охоплює межі 1,8 - 2,8 мм.

Згідно з наведеними залежностям, аналізуючи вплив часу процесу капсулювання на крупність отриманих гранул, можна стверджувати, що на збільшення розміру гранул впливає зростання тривалості процесу капсулювання від 20 хв (рисунки 3.14 *а*, 3.15 *а*) до 40 хв (рисунки 3.14 *б*, 3.15 *б*). При цьому розмір гранул збільшується на 15-20 %. Подальше зростання тривалості процесу капсулювання до 60 хв при незмінній витраті суспензії, як видно з графіків, не призводить до значного збільшення розміру гранул, а лише збільшує енерговитрати на проведення процесу. Зменшення тривалості процесу капсулювання нижче 20 хв є недоцільним, оскільки це призводить до отримання досить дрібних гранул, розміром менше 2 мм.

Збільшення витрати зрошуваної суспензії від 10 мл/хв до 20 мл/хв призводить до збільшення крупності одержуваних гранул, розмір яких збільшується на 18-20 %. Крім цього, зростає вміст частинок однакового розміру в полідисперсній суміші на 10 % при тривалості процесу капсулювання 20 хв (рисунки 3.14 *а*, 3.15 *а*). У той же час, при тривалості процесу в межах 40-60 хв, як показують залежності на рисунку 3.14 (*б*, *в*) та рисунку 3.15 (*б*, *в*) при збільшенні витрати зрошуваної суспензії максимум кривої розподілу зміщується в бік більш великих частинок (від $D = 2,5 - 3$ мм до $D = 3 - 3,5$ мм) при однаковому вмісті зазначених частинок в суміші (близько 40 %).

Тобто збільшення витрати зрошуваної суспензії понад 20 мл/хв не призводить до збільшення вмісту великих гранул в суміші, а вимагає тільки підвищених енерговитрат на проведення процесу капсулювання. Зменшення ж витрати суспензії нижче величини 10 мл/хв призводить до отримання дрібних гранул, розмір яких менше 2 мм, що не відповідає вимогам якісного продукту.

Існування оптимального діапазону по зрошуваній суспензії в межах 10-20 мл/хв і тривалості процесу капсулювання 30-50 хв добре ілюструються графіком залежності на рисунку 3.13.

Для визначення явного виду кривої розподілу гранул апроксимуємо експериментальні дані. Аналітично результати експериментів найкраще описує поліноміальна функція 4-го ступеня. У загальному вигляді маємо:

$$f(D, \tau) = a_1 \cdot D^4 + a_2 \cdot D^3 + a_3 \cdot D^2 + a_4 \cdot D + a_5, \quad (3.5)$$

де a_1, a_2, a_3, a_4, a_5 – параметри функції, що залежать від часу проведення процесу.

Числові значення коефіцієнтів рівняння (3.5) наведені в таблиці 3.4.

Таблиця 3.4 – Числові значення параметрів функції розподілу гранул у відповідний момент часу при витраті суспензії 10 мл/хв (20 мл/хв)

Час, хв	Параметри функції					Величина достовірності апроксимації
	a_1	a_2	a_3	a_4	a_5	
0	-194,67 (-194,67)	2224 (2224)	-9326,9 (-9326,9)	16951 (16951)	11191 (11191)	$R^2=1$ ($R^2=1$)
20	-1,3333 (40)	47,6 (-447,07)	-366,47 (1792,7)	1013 (-3035,7)	-890,39 (1844)	$R^2=1$ ($R^2=1$)
40	24,333 (-33)	-251,87 (338,53)	910,29 (-1277,1)	-1330,9 (2123,2)	663,56 (-1309,4)	$R^2=1$ ($R^2=1$)
60	18,333 (-16,667)	-197,47 (152,27)	741,04 (-492,78)	-1122,7 (687,28)	581,66 (-353,34)	$R^2=1$ ($R^2=1$)

Залежність (3.5), як видно, добре описує даний експеримент, але отримані коефіцієнти важко узагальнити для інших умов процесу капсулювання. Тому укрупнення полідисперсних гранул у киплячому шарі пропонується

відстежувати по збільшенню їх середньозваженого діаметра за залежністю, яку отримано при інтегруванні рівняння (1.12):

$$D = D_0 \exp\left(\frac{g_0 \cdot \tau}{\psi}\right), \quad (3.6)$$

де g_0 – питома витрата матеріалу оболонки (віднесена до маси вихідних гранул), c^{-1} ;

D_0 – середньозважений діаметр вихідних гранул, mm ;

ψ – коефіцієнт, що залежить від числа псевдозрідження (робочої швидкості повітря), режимних параметрів форсунки, співвідношення висоти шару і висоти факела розпилювання тощо.

Складова $\exp\left(\frac{g_0 \cdot \tau}{\psi}\right)$ є показовою, тобто показує у скільки разів збільшується початковий діаметр гранул в конкретний момент часу ведення процесу.

Апроксимуючи результати експерименту (рис. 3.13), за допомогою методу найменших квадратів, маємо:

$$\psi = 7,5 \cdot 10^{-4} \cdot \tau + 1,74. \quad (3.7)$$

Відтак, рівняння (3.6) матиме наступний вигляд:

$$D = D_0 \exp\left(\frac{g_0 \cdot \tau}{7,5 \cdot 10^{-4} \cdot \tau + 1,74}\right). \quad (3.8)$$

Результати теоретичних розрахунків за формулою (3.8) і експериментальних досліджень змінення середньозваженого діаметра частинок протягом процесу капсулювання приведені на рисунках 3.16 та 3.17.

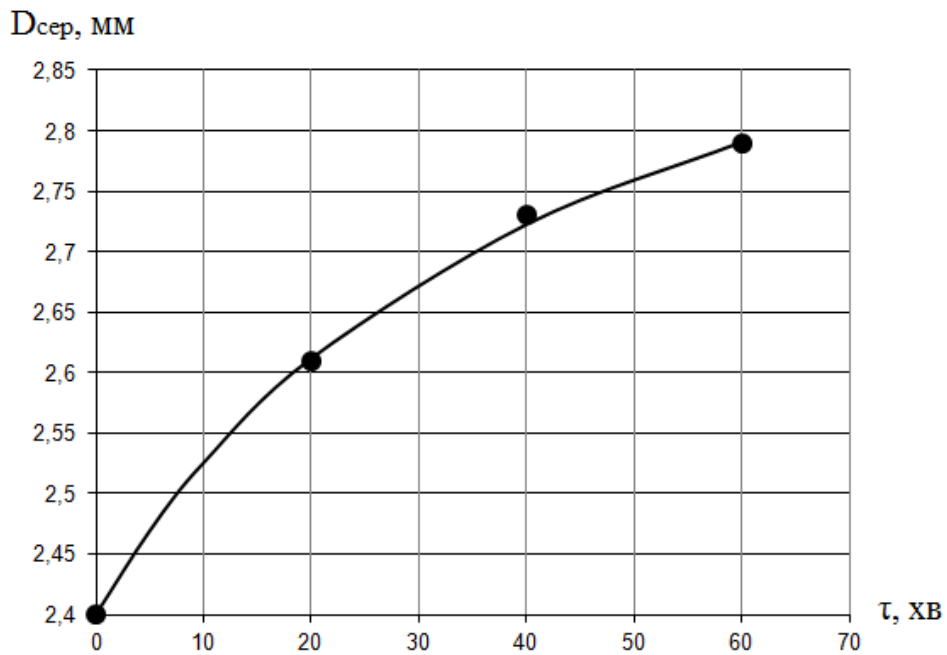


Рисунок 3.16 – Порівняння теоретичних (лінія) та експериментальних (точки) значень укрупнення середньозваженого діаметра частинок при питомій витраті суспензії $g_0 = 1,86 \cdot 10^{-4} \text{ кг}/(\text{кг} \cdot \text{с})$ ($G_C = 10 \text{ мл}/\text{хв}$)

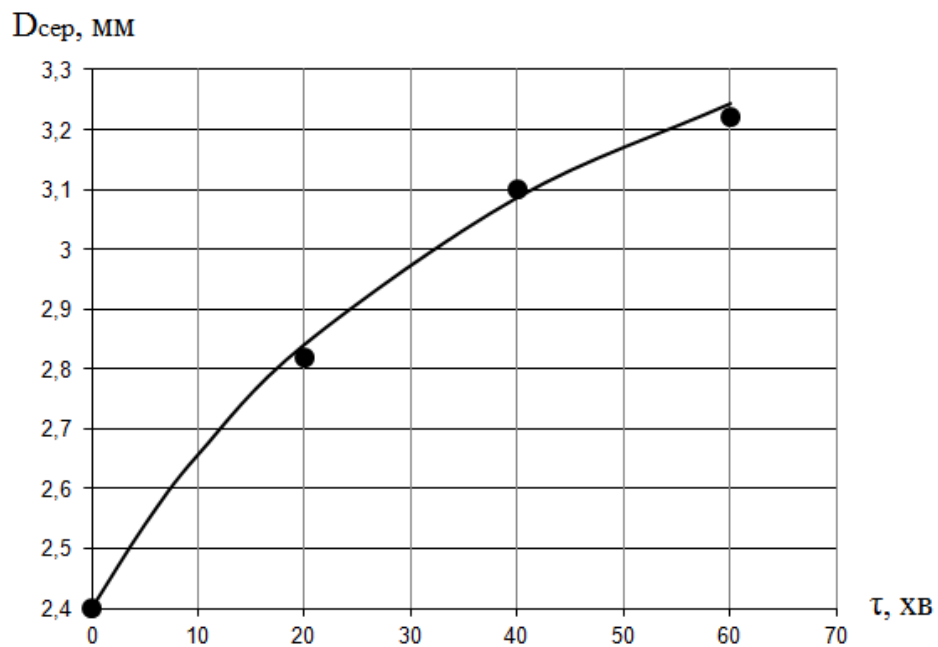


Рисунок 3.17 – Порівняння теоретичних (лінія) та експериментальних (точки) значень укрупнення середньозваженого діаметра частинок при питомій витраті суспензії $g_0 = 3,72 \cdot 10^{-4} \text{ кг}/(\text{кг} \cdot \text{с})$ ($G_C = 20 \text{ мл}/\text{хв}$)

Результати експериментальних досліджень кінетики росту монодисперсного шару гранул приведені на рисунках 3.18 та 3.19.

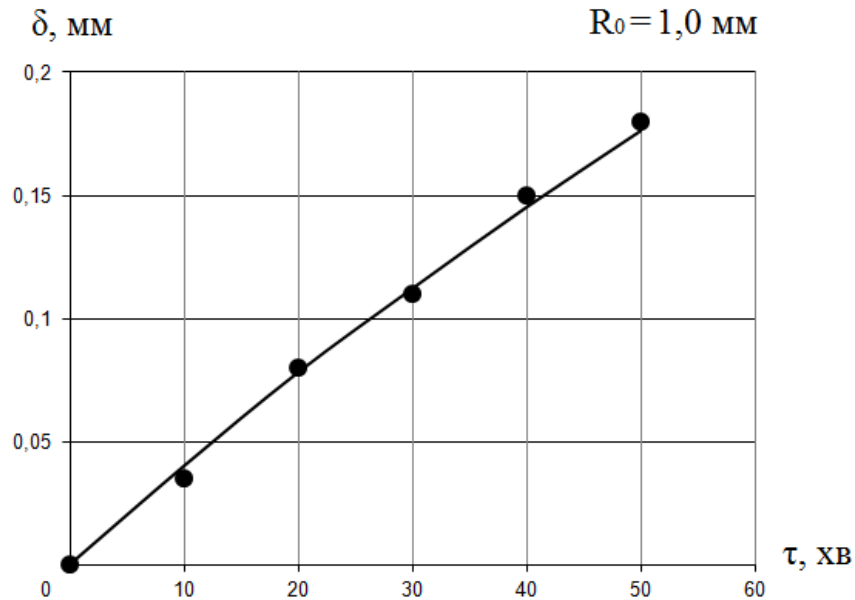


Рисунок 3.18 – Експериментальні значення кінетики нарощування органічної оболонки при витраті суспензії $G_C = 10$ мл/хв

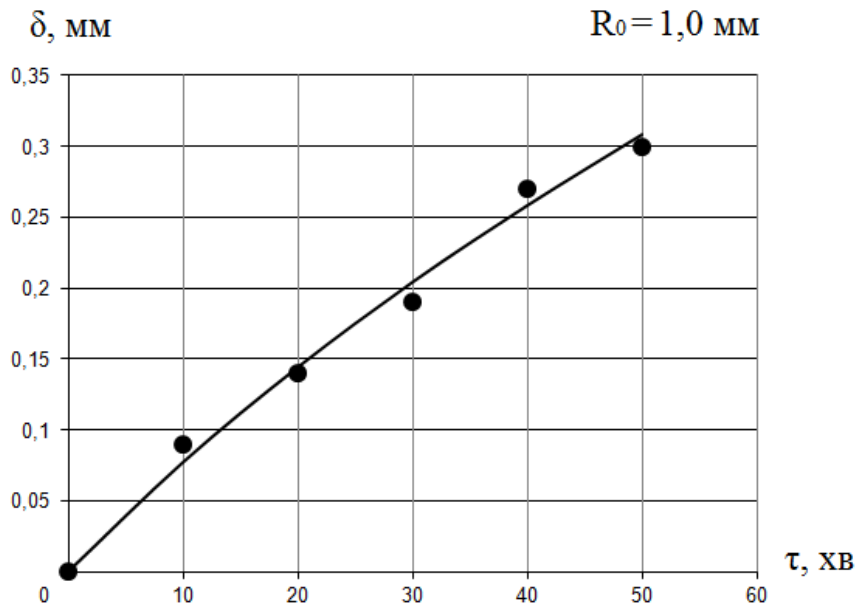


Рисунок 3.19 – Експериментальні значення кінетики нарощування органічної оболонки при витраті суспензії $G_C = 20$ мл/хв

Графіки на рисунках 3.18 та 3.19 показують, що збільшення навантаження по суспензії від 10 мл/хв до 20 мл/хв призводить до збільшення товщини органічної оболонки в 1,5-2 рази, причому зі збільшенням тривалості проведення процесу капсулювання зменшується величина приросту товщини оболонки.

3.5 Експериментальне дослідження теплообміну процесу капсулювання. Узагальнення результатів

На підставі отриманих експериментальних значень проводили розрахунок коефіцієнта тепловіддачі α від теплового агента до поверхні частинок під час випаровування суспензії за рівнянням тепловіддачі [67]:

$$\alpha = \frac{Q}{F \cdot (t_H - t_T)}, \quad (3.9)$$

де Q – теплота, що передається через поверхню F , Вт;

F – поверхня теплообміну, м²;

t_H – температура навколишнього середовища, °С;

t_T – температура поверхні твердих частинок, °С.

Кількість теплоти Q , яка витрачається на нагрів та випаровування суспензії, визначали за допомогою рівнянь (3.10) і (3.11):

$$Q_{нагрC} = G_C \cdot c_C \cdot (t_C - t_{C0}), \quad (3.10)$$

$$Q_{випC} = G_{випC} \cdot r, \quad (3.11)$$

де G_C – масова витрата суспензії, кг/с;

$G_{випC}$ – масова витрата вологи (води), що випаровується, кг/с;

c_C – теплоємність суспензії, Дж/(кг·К);

t_C – температура суспензії на поверхні частинок, °С;

t_{C0} – початкова температура суспензії, °С;

r – питома теплота випаровування води, Дж/кг.

Кількість теплоти Q , яка залишається в шарі матеріалу може бути визначена за рівнянням:

$$Q = G_{II} \cdot c_{II} \cdot (t_{II1} - t_{II2}), \quad (3.12)$$

де G_{II} – масова витрата повітря, кг/с;

c_{II} – теплоємність повітря, Дж/(кг·К);

t_{II1} – температура повітря під газорозподільною решіткою, °С;

t_{II2} – температура повітря на виході з робочої зони апарата, °С.

Для подальших розрахунків приймаємо, що теплові втрати в навколишнє середовище відсутні, тоді кількість теплоти Q , яка залишається в шарі матеріалу може бути визначена:

$$Q = Q_{нагрC} + Q_{випC}. \quad (3.13)$$

Із урахуванням (3.10) – (3.12) рівняння (3.13) переписеться у вигляді:

$$G_{II} \cdot c_{II} \cdot (t_{II1} - t_{II2}) = G_C \cdot c_C \cdot (t_C - t_{C0}) + G_{випC} \cdot r. \quad (3.14)$$

З рівняння (3.14) температура суспензії на поверхні частинок виразиться:

$$t_C = \frac{G_{II} \cdot c_{II} \cdot (t_{II1} - t_{II2}) - G_{випC} \cdot r}{G_C \cdot c_C} + t_{C0}. \quad (3.15)$$

Якщо допустити, що температура поверхні твердих частинок дорівнює температурі суспензії на їх поверхні, то маємо змогу розрахувати усереднені значення коефіцієнта тепловіддачі за рівнянням (3.9) та побудувати залежність коефіцієнта тепловіддачі від дійсної швидкості зріджуючого повітря (рисунок 3.20).

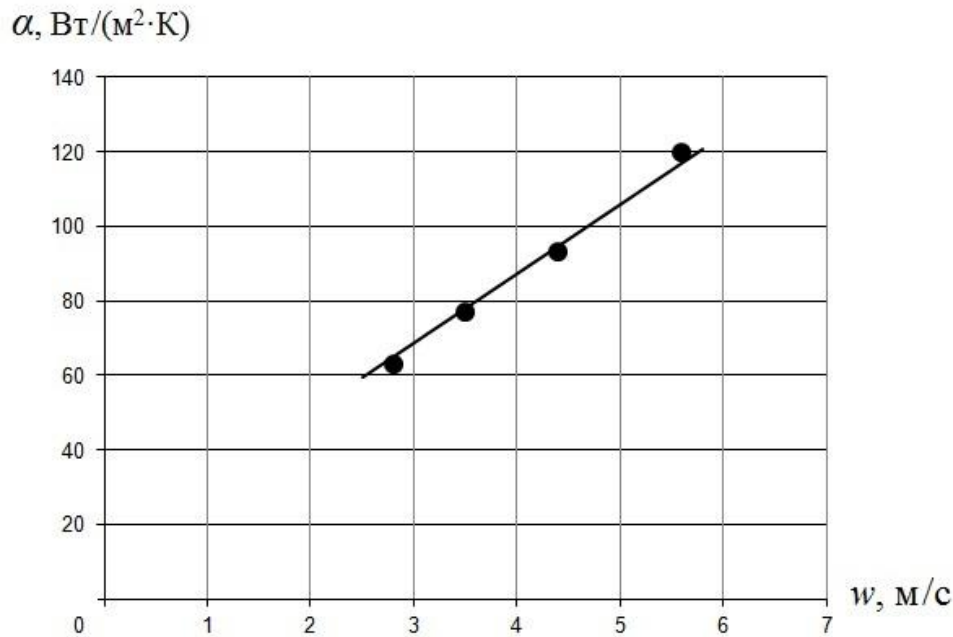


Рисунок 3.20 – Залежність коефіцієнта тепловіддачі від швидкості зріджуючого повітря при покритті гранул карбаміду суспензією курячого посліду

Із рисунка 3.20 видно, що отримані експериментальні точки у дослідному діапазоні апроксимуються прямою лінією: зі збільшенням швидкості повітря від 2,8 м/с до 5,5 м/с величина коефіцієнта тепловіддачі зростає, що відповідає традиційним уявленням про залежність інтенсивності теплообміну від швидкості газового потоку [54, 55].

Узагальнення експериментальних результатів (рисунок 3.20) проводили за рівнянням (1.4), в якому:

Nu – критерій Нусельта;

Re – критерій Рейнольдса;

Pr – критерій Прандтля.

У нашому випадку, оскільки фізичні параметри повітря змінюються у вузькому діапазоні, $m=0,33$.

Невідомі коефіцієнти “ A ” і “ n ” визначаємо шляхом представлення експериментальних значень в системі координат з логарифмічним масштабом шкал у вигляді залежності:

$$\frac{Nu}{Pr^{0,33}} = f(Re). \quad (3.16)$$

Із графічної залежності (рисунок 3.21) визначаємо невідомі коефіцієнти для процесу покриття гранул карбаміду суспензією курячого посліду: $A=0,04$; $n=0,85$.

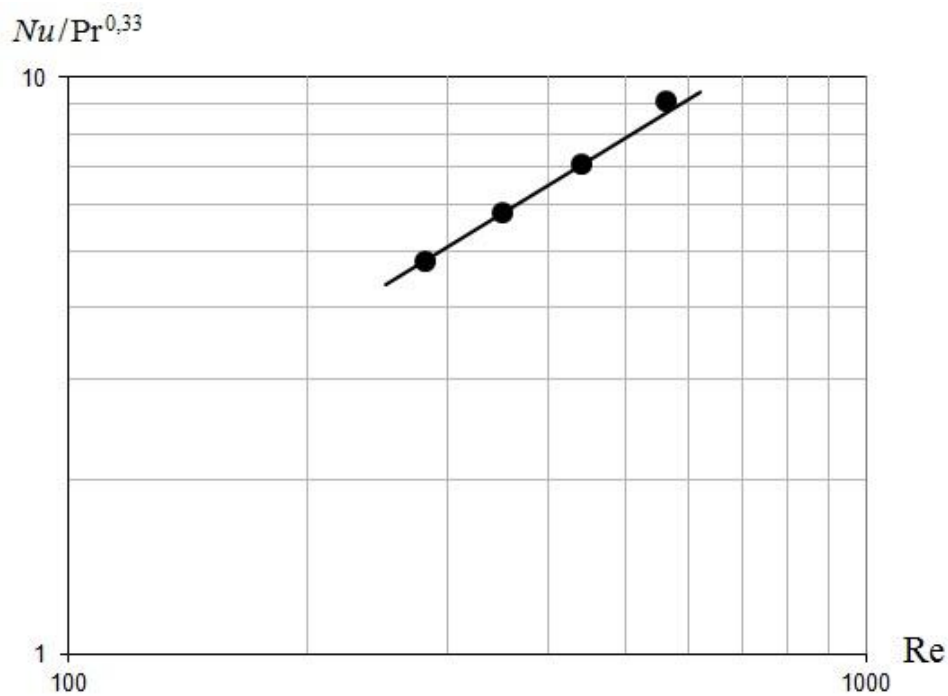


Рисунок 3.21 – Залежність $\frac{Nu}{Pr^{0,33}} = f(Re)$

Отримані значення коефіцієнтів “ A ” і “ n ” корелюються зі значеннями інших авторів [27, 79, 89] відповідно чисельного порядку отриманих величин.

Підставивши визначені значення у рівняння (1.4), отримуємо:

$$Nu = 0,04 \cdot Re^{0,85} \cdot Pr^{0,33} . \quad (3.17)$$

За допомогою рівняння (3.17) маємо змогу прогнозувати значення коефіцієнтів тепловіддачі для процесу покриття гранул карбаміду суспензією курячого посліду з точністю $\pm 8,4 \%$.

Висновки до третього розділу

1. Встановлено механізм дорощування мінеральних гранул органічною речовиною та сформульовано фізичну модель процесу.
2. Експериментально встановлені характерні температурні режими процесу покриття гранул карбаміду суспензією курячого посліду.
3. Отримано емпіричну залежність (3.3) для прогнозування зміни гідравлічного опору гранул карбаміду в стані псевдозрідження в умовах їх зрошення суспензією курячого посліду.
4. Встановлено, що дорощування гранул органічною речовиною при робочих умовах характеризується рівномірно-поверхневим (нормальним) зростанням – без утворення нових органічних центрів грануляції.
5. Отримано емпіричне рівняння (3.8), яке дозволяє прогнозувати укрупнення полідисперсного шару мінеральних гранул при їх капсулюванні суспензією курячого посліду в апараті киплячому шарі.
6. Отримано критеріальне рівняння (3.17) для визначення коефіцієнту тепловіддачі від теплового агента до поверхні частинок під час випаровування органічної суспензії.

Основні результати опубліковано в наступних працях [110-112].

РОЗДІЛ 4

МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ПРОЦЕСУ КАПСУЛЮВАННЯ ГРАНУЛ МІНЕРАЛЬНИХ ДОБРІВ ОРГАНІЧНОЮ ОБОЛОНКОЮ

Розробку та впровадження апаратів з киплячим шаром на багатьох виробництвах стримує відсутність надійних методів їх розрахунку. Одна з основних причин – недостатня вивченість складних і різноманітних процесів у киплячому шарі. Математична модель дозволяє встановити та оптимізувати режимно-технологічні параметри досліджуваного процесу, а також мінімізує застосування додаткових засобів автоматизації. Тому останнім часом велика увага приділяється побудові принципів математичних моделей.

При побудові математичної моделі слід враховувати, що в реальному апараті киплячого шару одночасно знаходиться величезна кількість частинок. Ці частинки мають різні розміри і рухаються з різними швидкостями у будь-яких напрямках. У процесі періодичних переміщень плівка органічної суспензії потрапляє на гранулу, висихає і залишає на її поверхні зневоднений залишок. Нарощування значного шару осаду відбувається протягом багатьох таких циклів [62].

У даному розділі приведені теоретичні основи методу зневоднення і грануляції органічної суспензії в апаратах з киплячим шаром, які в подальшому можуть бути використані для розрахунку реальних процесів. Слід зазначити, що принцип киплячого шару використовується в апаратах різних конструкцій, що працюють при різних технологічних режимах. Однак, процеси росту і ущільнення гранул підкоряються єдиним аналітичним залежностям.

4.1 Закономірності розподілу матеріальних потоків та кінетики процесу капсулювання в апараті киплячого шару

Для написання матеріального балансу періодичного процесу капсулювання складемо схему матеріальних потоків (рисунок 4.1).

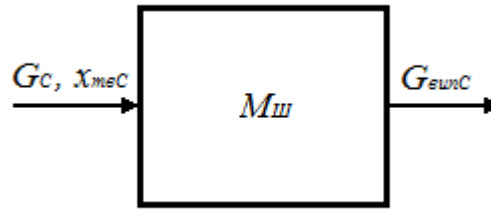


Рисунок 4.1 – Схема матеріальних потоків: G_C – масова витрата органічної суспензії, $кг/с$; x_{meC} – масова доля дрібних органічних включень в суспензії; $G_{випC}$ – масова витрата вологи, що випаровується, $кг/с$

Із рисунка 4.1 видно, що зміна маси шару частинок відбувається внаслідок введення органічної суспензії та її випаровування.

При початкових умовах:

$$M_{III}(0) = M_{III}^I, \quad (4.1)$$

де M_{III} , M_{III}^I – відповідно поточна та початкова маси шару, $кг$.

Зміна маси матеріалу в апараті киплячого шару характеризується наступним рівнянням:

$$\frac{dM_{III}}{d\tau} = G_C - G_{випC}, \quad (4.2)$$

де $d\tau$ – проміжок часу проведення процесу, $с$.

В ідеальному випадку (коли вся волога, що вноситься з суспензією, випаровується) рівняння (4.1) запишемо у вигляді:

$$M_{III} = G_C \cdot x_{meC} \cdot \tau + M_{III}^I. \quad (4.3)$$

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 приймається допущення, що всі частинки в шарі однакового розміру і мають правильну (сферичну) форму (рисунок 4.2).

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

$$dM = (G_C \cdot x_{meC}) d\tau = G_0 d\tau, \quad (4.4)$$

де dM – приріст органічної маси, кг;

G_0 – витрата матеріалу оболонки, кг/с.

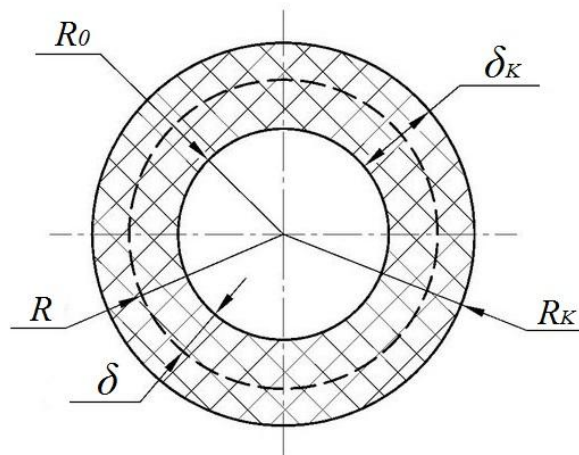


Рисунок 4.2 – Розрахункова схема частинки покритої органічною плівкою:
 R_0, R, R_K – початковий, поточний і кінцевий радіуси часток відповідно; δ, δ_K –
 поточна і кінцева товщини плівки

Розглянемо збільшення маси шару органічної оболонки на поверхні сферичної частинки в момент часу від τ_0 до τ ($\tau_0 = 0$). При цьому розміри частинок змінюються від R_0 до R відповідно ($R_0 < R$). Відтак, отримуємо, що:

$$M = \int_0^{\tau} G_0 d\tau = G_0 \cdot \tau. \quad (4.5)$$

Загальна маса органічної оболонки гранул:

$$M = \rho_{OB} \cdot n \cdot \frac{4}{3} \cdot \pi \cdot (R^3 - R_0^3), \quad (4.6)$$

де n – кількість частинок в шарі;

ρ_{OB} – щільність матеріалу оболонки, $кг/м^3$.

Підставляємо рівняння (4.6) в рівняння (4.4) і отримуємо:

$$G_0 \cdot \tau = \rho_{OB} \cdot n \cdot \frac{4}{3} \pi \cdot (R^3 - R_0^3). \quad (4.7)$$

Перепишемо рівняння (4.7) відносно величини R^3 :

$$R^3 = \frac{3}{4\pi n} \cdot \frac{G_0 \cdot \tau}{\rho_{OB}} + R_0^3. \quad (4.8)$$

Загальний об'єм вихідних гранул можна виразити за допомогою рівнянь (4.9) і (4.10):

$$V_{GP} = \frac{M_{GP}}{\rho_{GP}}, \quad (4.9)$$

де V_{GP} – об'єм вихідних гранул, $м^3$;

M_{GP} – маса вихідних гранул, $кг$;

ρ_{GP} – щільність матеріалу вихідних гранул, $кг/м^3$.

$$V_{GP} = \frac{4}{3} \cdot \pi \cdot R_0^3 \cdot n. \quad (4.10)$$

Рівняння (4.10) переписуємо в такому вигляді:

$$\frac{R_0^3}{V_{ГР}} = \frac{3}{4\pi n}. \quad (4.11)$$

Підставивши рівняння (4.11) в рівняння (4.8), отримуємо:

$$R^3 = \frac{R_0^3}{V_{ГР}} \cdot \frac{G_0 \tau}{\rho_{ОБ}} + R_0^3. \quad (4.12)$$

Із урахуванням (4.9) рівняння (4.12) переписуємо у вигляді:

$$R^3 = \frac{R_0^3 \cdot \rho_{ГР} \cdot g_0 \cdot \tau}{\rho_{ОБ}} + R_0^3, \quad (4.13)$$

де g_0 – питома витрата матеріалу оболонки (віднесена до маси вихідних гранул), $кг/(кг \cdot с)$.

Поточну товщину органічної оболонки (рис. 4.3) визначаємо з наступного рівняння:

$$\delta = R - R_0. \quad (4.14)$$

Із урахуванням (4.13) рівняння (4.14) переписуємо у вигляді:

$$\delta = \sqrt[3]{\frac{R_0^3 \cdot \rho_{ГР} \cdot g_0 \cdot \tau}{\rho_{ОБ}} + R_0^3} - R_0. \quad (4.15)$$

Таким чином, отримуємо залежність, яка дає змогу спрогнозувати значення товщини органічної оболонки в будь-який момент часу:

$$\delta = R_0 \cdot \left(\sqrt[3]{g_0 \cdot \frac{\rho_{ГР}}{\rho_{ОБ}} \cdot \tau + 1} - 1 \right). \quad (4.16)$$

Результати математичного моделювання кінетики нарощування органічної оболонки порівнювались із експериментальними дослідженнями процесу в апараті псевдозрідженого шару з форсунковим розпилюванням.

Результати теоретичних розрахунків за формулою (4.16) і експериментальних досліджень кінетики нарощування органічної оболонки приведені на рисунках 4.3 та 4.4.

Як це видно з рисунків 4.3 та 4.4, 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.

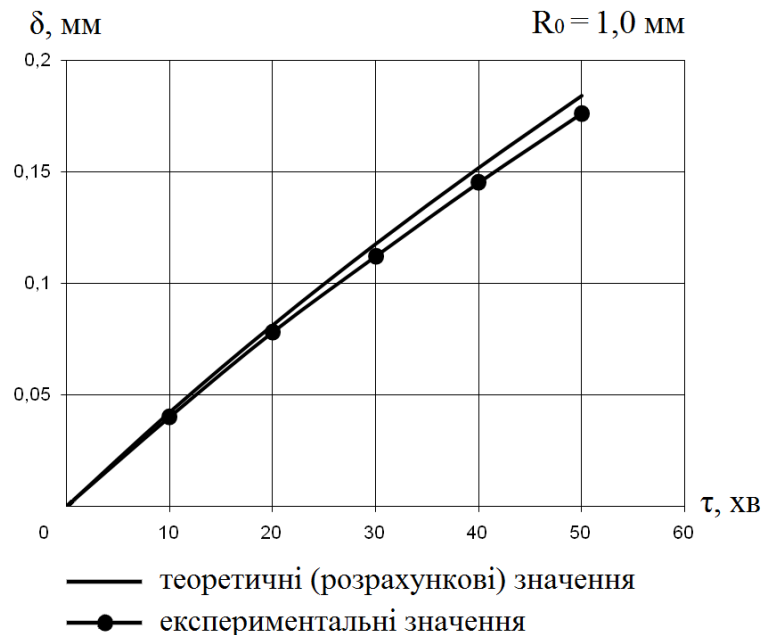


Рисунок 4.3 – Порівняння теоретичних та експериментальних значень кінетики нарощування органічної оболонки при $g_0 = 1,86 \cdot 10^{-4} \text{ кг}/(\text{кг} \cdot \text{с})$

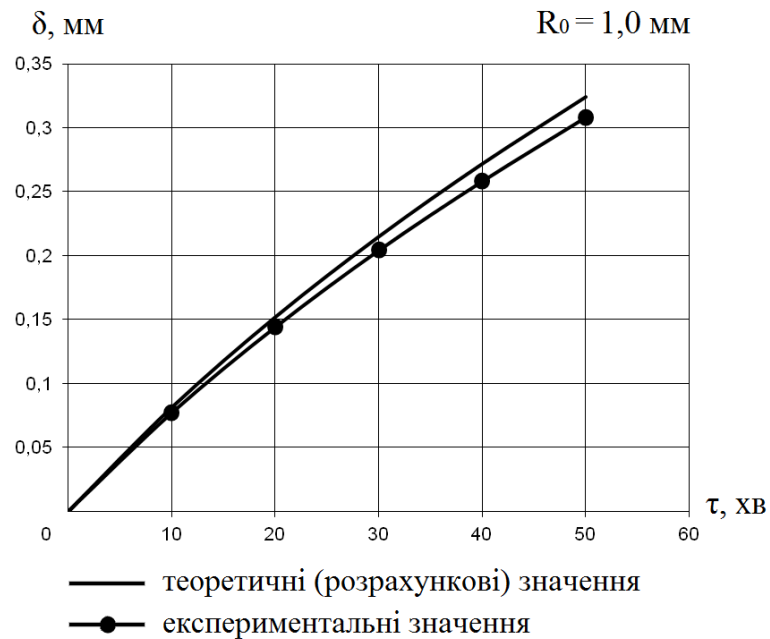


Рисунок 4.4 – Порівняння теоретичних та експериментальних значень кінетики нарощування органічної оболонки при $g_0 = 3,72 \cdot 10^{-4} \text{ кг}/(\text{кг} \cdot \text{с})$

Врівноважити теоретичні значення з експериментальними можна за рахунок коефіцієнта пропорційності k . Відтак рівняння (4.16) буде мати наступний вигляд:

$$\delta = k \cdot R_0 \cdot \left(\sqrt[3]{g_0 \cdot \frac{\rho_{ГР}}{\rho_{ОБ}} \cdot \tau + 1} - 1 \right). \quad (4.17)$$

Продиференціюємо рівняння (4.17):

$$\frac{d\delta}{d\tau} = \frac{d}{d\tau} \left[k \cdot R_0 \cdot \left(\sqrt[3]{g_0 \cdot \frac{\rho_{ГР}}{\rho_{ОБ}} \cdot \tau + 1} - 1 \right) \right]. \quad (4.18)$$

Як результат отримуємо рівняння для визначення швидкості росту часток в псевдозрідженому шарі:

$$v = \frac{d\delta}{d\tau} = \frac{k \cdot R_0 \cdot g_0 \cdot \rho_{ГР}}{3 \cdot \rho_{ОБ} \cdot \sqrt[3]{\left(g_0 \cdot \frac{\rho_{ГР}}{\rho_{ОБ}} \cdot \tau + 1\right)^2}} \quad (4.19)$$

Кінетика росту гранул в псевдозрідженому шарі залежить від початкового розміру гранул, питомої витрати та густини суспензії, щільності матеріалу гранул затравки, які враховує формула (4.19). Результати теоретичних розрахунків за формулою (4.19) приведені на рисунку 4.5.

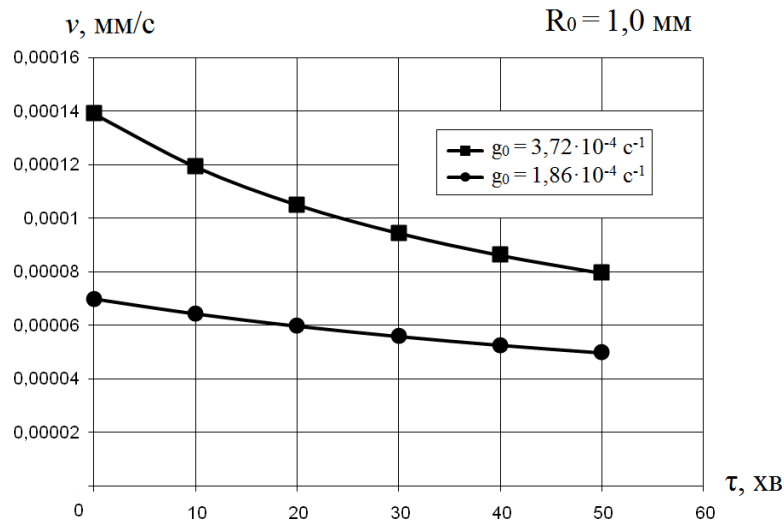


Рисунок 4.5 – Зміна швидкості росту частинок в псевдозрідженому шарі протягом процесу капсулювання

Із рисунка 4.5 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.

4.2 Закономірності розподілення потоків твердої фази в процесі капсулювання у киплячому шарі

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 вищерозташовані комірки за рахунок їх винесення газовим потоком. Таким чином, у псевдозрідженому шарі має місце процес пневмокласифікації, який полягає в тому, що відбувається розшарування гранул за розміром: знизу зосереджуються великі гранули, вище – гранули меншого розміру, а зверху киплячого шару – дрібні гранули.

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:

$$\frac{\partial M_i(\tau)}{\partial \tau} \int_0^{\infty} f(R) dR = M_{i-1}(\tau) \int_0^{\infty} f(R) dR - M_{i+1}(\tau) \cdot \theta_i \int_0^{\infty} f(R) dR, \quad (4.20)$$

де $f(R)$ – функція розподілу гранул за розмірами;

M_{i-1} , M_i , M_{i+1} – маса гранул у відповідному елементарному об'ємі шару, кг;

R – радіус гранул, м;

τ – час проведення процесу, с.

Функція розподілу (щільність розподілу) гранул за розмірами характеризує частку гранул розміром від R до $R+dR$ у довільний момент часу. Тобто, функція $f(R)$ змінюється в часі на кожному кроці траєкторії руху часток і нормується до одиниці:

$$\int_0^{\infty} f(R)dR = 1. \quad (4.21)$$

Уся сільгосптехніка, що використовується для внесення гранульованих добрив у ґрунт орієнтована на максимальний розмір гранул 4-5 мм [6]. Також, враховуючи, що до процесу залучалися гранули з мінімальним діаметром 1,5 мм, то для нашого випадку рівняння (4.21) матиме нові визначені межі інтегрування:

$$\int_{R=0,75}^{R=2,5} f(R)dR = 1. \quad (4.22)$$

На виході з об'єму шару функція розподілу гранул за розмірами являє собою відношення масової частки частинок, які мають розміри у діапазоні $(R, R+dR)$, до ширини цього діапазону dR , при прагненні останнього до нуля. Тоді:

$$f(R) = \lim_{dR \rightarrow 0} \frac{m_i}{dR} = \frac{m_i}{dR_{\min}}, \quad (4.23)$$

де m_i – масова частка частинок i -ої фракції;

dR_{\min} – мінімальний інтервал розмірів частинок i -ої фракції, м; $dR_{\min} \leq 0,1$;

$dR_{\min} \leq m_i$.

Функція розподілу гранул за розмірами виразиться:

$$\frac{\partial f(R)}{\partial \tau} = \text{div}(u_T f(R)) + \frac{\partial(vf(R))}{\partial R} - \frac{\partial f(R)}{\partial G_y} \cdot \frac{dG_y}{d\tau}. \quad (4.24)$$

Отже, згідно з рівнянням (4.24), функція зміни щільності розподілу гранул за розмірами в будь-якій локальній області шару визначається переміщенням гранул з однієї точки робочого об'єму апарата в інший. Це відбувається за рахунок:

1) вимушеного руху потоку частинок (перший доданок враховує конвективний перенос гранул):

$$\operatorname{div}(u_T f(R)) = \frac{\partial u_{TX} f(R)}{\partial X} + \frac{\partial u_{TY} f(R)}{\partial Y} + \frac{\partial u_{TZ} f(R)}{\partial Z}. \quad (4.25)$$

2) збільшення діаметра гранул (другий доданок враховує швидкість лінійного росту гранул);

3) винесення з шару дрібних частинок (третьої доданок).

Розглянемо процес покриття органічною суспензією полідисперсного шару матеріалу. Приймаємо допущення, що шар матеріалу складається із сукупності гранул трьох розмірів R_1, R_2, R_3 , площа поверхні яких F_1, F_2, F_3 відповідно. Експериментально встановлено, що швидкість росту частинок в псевдозрідженому шарі не залежить від їх геометричного розміру: $dv/dR=0$. Це означає, що суспензія розподіляється пропорційно площі поверхні часток (рисунок 4.6).

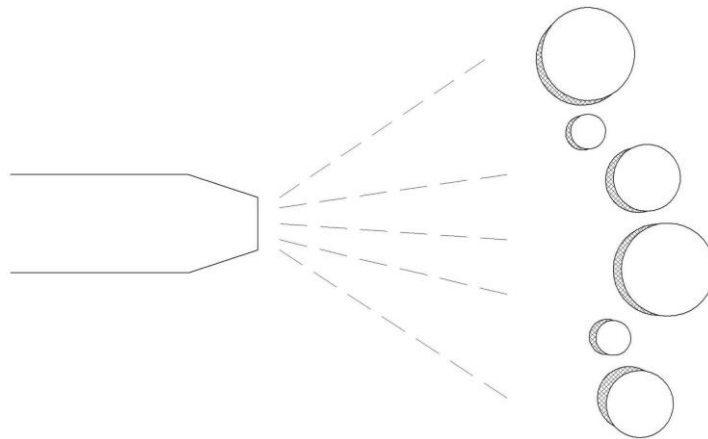


Рисунок 4.6 – Схема розпилення суспензії в полідисперсний шар гранул

Таким чином, товщина органічного покриття шару матеріалу залежить від сумірності двох факторів: кількості плівкотвірної суспензії та загальної площі поверхні гранул, тобто:

$$\frac{G_{C1}}{F_1} = \frac{G_{C2}}{F_2} = \frac{G_{C3}}{F_3}. \quad (4.26)$$

де G_{C1} , G_{C2} , G_{C3} – доля суспензії, що потрапила на відповідну гранулу.

Такі обставини дозволяють розглядати апарат киплячого шару як систему із зосередженими параметрами, тобто вважати, що всі частинки знаходяться в однакових умовах.

Нехтуємо зміною гранульованого складу за рахунок конвективного переносу і унесення дрібних гранул за рахунок подрібнення та стирання. Також вводимо усереднену характеристику швидкості росту гранул ($v=const$). У такому випадку рівняння (4.24) перетворюється:

$$\frac{\partial f(R)}{\partial \tau} = v \frac{\partial (f(R))}{\partial R}. \quad (4.27)$$

Перетворенням Лапласа розв'язуємо рівняння (4.27):

$$R = R_0 + v \cdot [\ln f_k(R) - \ln f_H(R)] \cdot \tau. \quad (4.28)$$

Рівняння (4.28) описує функцію збільшення розміру частинок залежно від швидкості росту гранул і зміни щільності розподілу гранул за розмірами в киплячому шарі протягом часу τ .

Результати теоретичних розрахунків за формулою (4.28) і експериментальних досліджень приведені на рисунку 4.7.

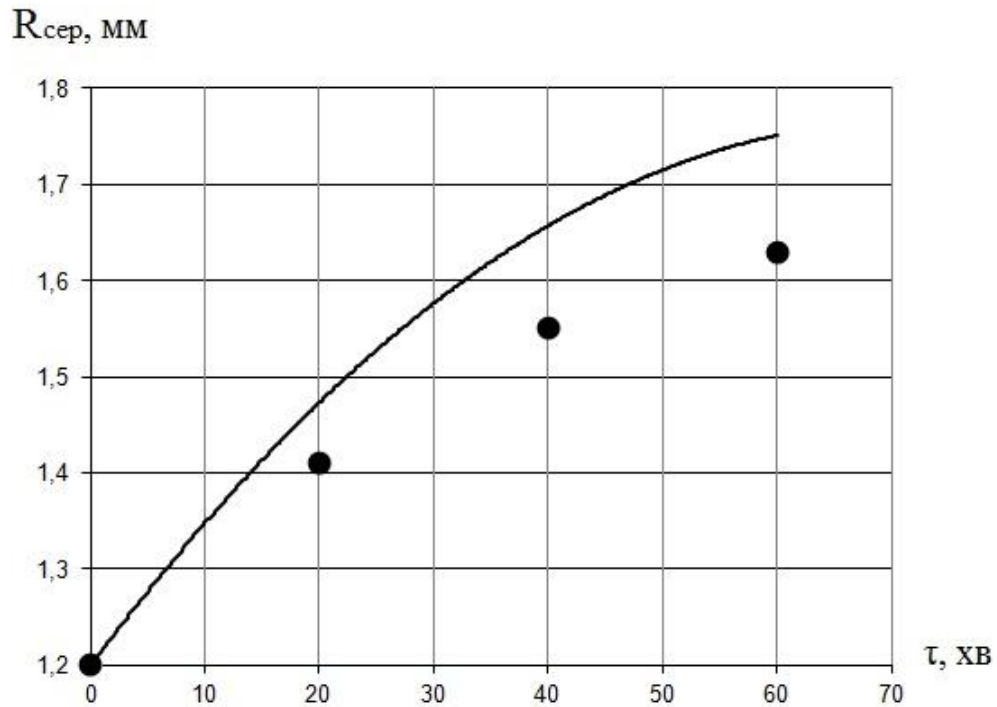


Рисунок 4.7 – Порівняння теоретичних (лінія) та експериментальних (точки) значень змінення середньозваженого радіуса частинок

Аналіз рисунка 4.7 показує, що розбіжність експериментальних та розрахованих за рівнянням (4.28) значень змінення розміру частинок в процесі капсулювання не перевищує 10 %.

4.3 Закономірності теплопереносу з потоками твердої фази у шарі матеріалу

Перенесення тепла у виділеному об'ємі ΔV за напрямом «х» 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 «у».

Відтак рівняння теплопереносу в потоці твердої фази запишеться у вигляді:

$$\begin{aligned} \int_V \frac{\partial t(\tau)}{\partial \tau} \left(N \cdot \rho_{ГР} \cdot c_{ГР} \left[\int_0^{\infty} f(R) dR \right] \cdot V_{ГР} \right) dV &= \int_V \frac{\partial t(x)}{\partial x} \left(N \cdot \rho_{ГР} \cdot c_{ГР} \cdot u_{ГР} \left[\int_0^{\infty} f(R) dR \right] \cdot V_{ГР} \right) dV - \\ - \int_V \frac{\partial t(\Delta x)}{\partial x} \left(N \cdot \rho_{ГР} \cdot c_{ГР} \cdot u_{ГР} \left[\int_0^{\infty} f(R) dR \right] \cdot V_{ГР} \cdot \theta_i \right) dV &+ \int_V \alpha(R, w) \cdot N \cdot F_{ГР} [t(R) - t_c] \times \\ \times \left[\int_0^{\infty} f(R, \tau) dR \right] dV - \int_V \frac{\partial t(y)}{\partial y} \left(N \cdot \rho_{ГР} \cdot c_{ГР} \cdot u_{ГР} \left[\int_0^{\infty} f(R) dR \right] \cdot V_{ГР} \cdot \theta_i \right) dV \end{aligned} \quad (4.29)$$

У рівнянні (4.29) об'ємна кількість частинок в шарі ($шт/м^3$) представлена:

$$N = \frac{n \cdot \rho_{ГР}}{V_{П} \cdot \rho_{П}}, \quad (4.30)$$

де n – кількість частинок в одиницю часу, $с^{-1}$;

$V_{П}$ – витрата сушильного агента, $м^3/с$.

$$n = \frac{G_{ГР}}{\rho_{ГР} \cdot V_{ГР} \int_0^{\infty} f(R) dR}, \quad (4.31)$$

де $G_{ГР} = G_{РЕТ} + G_0$ – витрата гранул, $кг/с$;

$G_{РЕТ}$ – кількість ретура, $кг/с$.

Витратна концентрація зваженого шару, $кг/кг$:

$$G_B = \frac{G_{ГР}}{V_{П} \cdot \rho_{П}} = \frac{G_{ГР}}{G_{П}}. \quad (4.32)$$

Враховуючи (4.31) і (4.32), рівняння (4.30) матиме наступний вигляд:

$$N = \frac{G_B}{V_{ГР} \int_0^{\infty} f(R) dR}. \quad (4.33)$$

Питома поверхня гранул у виділеному об'ємі, m^2/m^3 :

$$F_{ПШТ} = N \cdot F_T = \frac{6 \cdot (1 - \varepsilon)}{D}, \quad (4.34)$$

де ε – порізність киплячого шару.

Вважаємо, що у зваженому шарі в результаті активного перемішування частинок перенесення тепла за рахунок конвективного переміщення твердих частинок в напрямку «х» не відбувається. Також нехтуємо винесенням частинок газовим потоком.

Тоді, відкидаючи знаки інтегрування через довільність обраного об'єму, з урахуванням умови нормування функції розподілу гранул за розмірами отримаємо рівняння (4.29) в наступному вигляді:

$$G_B \cdot \rho_{ГР} \cdot c_{ГР} \frac{dt}{d\tau} = \frac{\alpha(R, w) \cdot 6 \cdot (1 - \varepsilon) \cdot [t(R) - t_C]}{R}. \quad (4.35)$$

Розв'язуючи рівняння (4.35) при початкових та граничних умовах, отримуємо рівняння для визначення температури твердих частинок:

$$t(\Delta\tau) = t(\tau) \cdot \exp\left(\frac{\alpha(R, w) \cdot 6 \cdot (1 - \varepsilon)}{G_B \cdot \rho_{ГР} \cdot c_{ГР} \cdot R}\right) \cdot \tau, \quad (4.36)$$

або

$$t_K = t_{II} \cdot \exp\left(\frac{\alpha(R, w) \cdot 6 \cdot (1 - \varepsilon)}{G_B \cdot \rho_{ГР} \cdot c_{ГР} \cdot R}\right) \cdot \tau_{II}, \quad (4.37)$$

де $\tau_{ГР}$ – тривалість прогріву частинки до заданої температури початку випаровування вологи з плівки суспензії на поверхні гранули, c .

Аналіз залежності (4.37) показує, що зміна температури поверхні твердих частинок у виділеному об'ємі киплячого шару в першу чергу залежить від коефіцієнта тепловіддачі з боку теплового агента, величина якого обумовлюється конкретними умовами процесу теплообміну в киплячому шарі, а також площі поверхні та теплофізичних властивостей гранул.

4.4 Закономірності розподілення температур в середині гранул при їх прогріві

В умовах капсулювання гранул у киплячому шарі, при їх одночасному сушінні, особливого значення набувають питання, пов'язані з визначенням температурних полів у твердій, приблизно кулястої форми, частинці та тривалості її прогріву до температури випаровування вологи з плівки суспензії, що покриває гранулу. Такий процес описується диференціальним рівнянням нестационарної теплопровідності [68]:

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} = a_{ГР} \cdot \left[\frac{\partial^2 t}{\partial r^2} + \frac{2}{r} \cdot \frac{\partial t}{\partial r} \right], \quad (4.38)$$

де $a_{ГР}$ – коефіцієнт температуропровідності твердої частинки, m^2/c ;

t – поточна температура частинки, $^{\circ}C$;

r – поточний радіус частинки, m ;

τ – час прогріву, c .

Приймаємо, що куляста частинка зовнішнім радіусом R являє собою однорідне і ізотропне середовище, яке характеризується певними величинами температуропровідності $a_{ГР}$, теплоємності $c_{ГР}$ та щільності $\rho_{ГР}$. Температура сушильного агента t_C і коефіцієнт тепловіддачі α залишаються постійними протягом всього процесу прогріву гранули.

Початкові умови, що передбачають рівномірний розподіл температури по об'єму гранули в початковий момент часу τ_0 , представляються у вигляді:

$$\tau > \tau_0, 0 < r < R, t(r, \tau_0) = f(r). \quad (4.39)$$

Умови симетрії мають вигляд:

$$t(0, \tau) \neq \infty, \frac{\partial t(0, \tau)}{\partial r} = 0. \quad (4.40)$$

Розв'язання рівняння (4.38) методом розділення змінних [68], при граничних умовах 3-го роду (рівність потоків тепла, підведених від газу до поверхні гранули і від неї всередину частинки):

$$\alpha \cdot [t(r, \tau) - t_c] = \lambda \frac{\partial t(r, \tau)}{\partial r}, \quad (4.41)$$

представляється у вигляді

$$\frac{t_T - t_{ТП}}{t_C - t_{ТП}} = 1 - \sum_{n=1}^{\infty} \frac{6}{\mu_n^2} B_n \exp(-\mu_n^2 Fo), \quad (4.42)$$

де t_T – середньооб'ємна поточна температура гранули, °C;

$t_{ТП}$ – початкова температура гранули, °C;

Fo – критерій Фур'є, $Fo = \frac{a_{ГР} \cdot \tau}{R^2}$;

B_n, μ_n – відповідно константа та корінь рівняння.

Оскільки процес прогріву є достатньо тривалим ($Fo \geq 0,3$), нескінченний ряд швидко сходиться і можна обмежитися тільки першим членом ряду ($n=1$) в рівнянні (4.42).

Тоді:

$$\frac{t_T - t_{ТП}}{t_C - t_{ТП}} = 1 - \frac{6 \cdot B_1}{\mu_1^2} \exp(-\mu_1^2 Fo). \quad (4.43)$$

З виразу (4.43) визначається або температура прогріву гранули $t_{ПР}$ (вважаючи, що $t_T = t_{ПР}$) сушильним агентом до закінчення процесу випаровування вологи з плівки суспензії:

$$t_{ПР} = (t_C - t_{ТП}) \cdot [1 - B_1 \exp(-\mu_1^2 Fo)] + t_{ТП}, \quad (4.44)$$

або час прогріву (сушіння) гранули $\tau_{ПР}$ до заданої температури початку випаровування вологи з плівки суспензії $t_{ВИП}$ (вважаючи, що $t_{ПР} = t_{ВИП}$):

$$\tau_{ПР} = \frac{R^2}{a_{ГР} \mu_1^2} \ln \left[\frac{B_1}{1 - \frac{t_{ВИП} - t_{ТП}}{t_C - t_{ТП}}} \right], \quad (4.45)$$

Константа B_1 та корінь μ_1 в рівняннях (4.44) та (4.45) залежать від величини критерію Біо:

$$B_1 = \frac{Bi^2}{\mu_1^2 + Bi^2 - Bi}, \quad (4.46)$$

$$\mu_1 = \sqrt{\frac{Bi^2}{B_1} - Bi^2 + Bi}; \quad (4.47)$$

У роботах [64, 67] надаються громіздкі таблиці для визначення цих значень, що є неможливим з метою їх використання для розрахунків на ЕОМ.

Тому для умов проведення даних досліджень в діапазоні зміни критерію Біо $0,1 < Bi < 0,5$ методом найменших квадратів були оброблені значення таблиць для постійної B_1 і отримано рівняння регресії у вигляді:

$$B_1 = 0,47(Bi) + 0,01. \quad (4.48)$$

Підставляючи (4.47) і (4.48) в рівняння (4.44) та (4.45), отримуємо:

$$t_{\text{ПР}} = (t_c - t_{\text{ПІ}}) \cdot \left[1 - (0,47(Bi) + 0,01) \exp \left(- \left(\frac{Bi^2}{0,47(Bi) + 0,01} - Bi^2 + Bi \right) Fo \right) \right] + t_{\text{ПІ}} \quad (4.49)$$

$$\tau_{\text{ПР}} = \frac{R^2}{a_{\text{ГР}} \cdot \left(\frac{Bi^2}{0,47(Bi) + 0,01} - Bi^2 + Bi \right)} \ln \left[\frac{0,47(Bi) + 0,01}{1 - \frac{t_{\text{ВІПІ}} - t_{\text{ПІ}}}{t_c - t_{\text{ПІ}}}} \right]. \quad (4.50)$$

Визначення часу прогріву гранули $\tau_{\text{ПР}}$ за залежністю (4.50) дає змогу отримати значення температури твердих частинок у киплячому шарі t_K за рівнянням (4.37). Для запобігання проникнення вологи через прикордонний шар всередину гранули необхідно виконання умови: $t_K \geq t_{\text{ПР}}$. Значення температури прогріву гранули $t_{\text{ПР}}$ визначається за залежністю (4.49). Таким чином, аналітичні вирази (4.49) та (4.50) дозволяють значно спростити алгоритм розрахунків.

4.5 Методика розрахунку процесу покриття гранул мінеральних добрив органічною суспензією

Розрахунок зводиться до визначення гідравлічного опору шару, робочої швидкості повітря та продуктивності по суспензії.

Вихідними даними для розрахунку є:

- геометричні розміри апарата;
- значення товщини оболонки;
- фізичні властивості мінеральних гранул, органічної суспензії та псевдозріджуючого повітря.

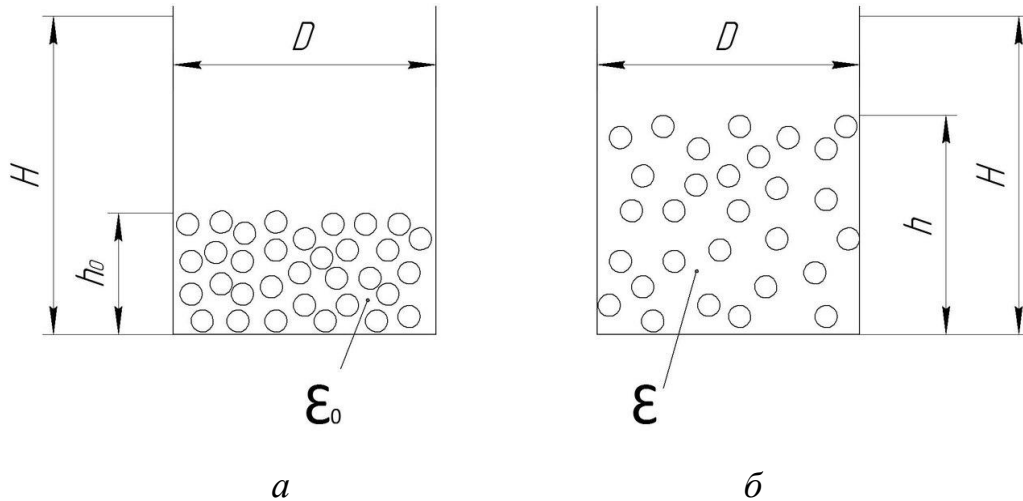


Рисунок 4.8 – Розрахункова схема апарата з нерухомим шаром дисперсного матеріалу (а) та у стані псевдозрідження (б):

h_0, ϵ_0 – висота і порізність нерухомого шару матеріалу; h, ϵ – висота і порізність киплячого шару; D – діаметр апарата, м; H – висота робочої зони апарата, м

Початок псевдозрідження настає при рівності сили гідравлічного опору шару і ваги всіх його часток, тобто коли сила земного тяжіння гранул врівноважується аеродинамічною силою з боку повітря.

Визначення гідравлічного опору киплячого шару.

Об'єм, що займає киплячий шар матеріалу:

$$V = S \cdot h, \quad (4.51)$$

де S – площа поперечного перерізу апарата, m^2 .

$$S = \frac{\pi \cdot D^2}{4}. \quad (4.52)$$

Із урахування порізності (вільного об'єму), об'єм твердих частинок у шарі буде дорівнювати:

$$V_{GP} = S \cdot h \cdot (1 - \varepsilon). \quad (4.53)$$

Сила тяжіння шару розраховується за формулою:

$$G_{GP} = S \cdot h \cdot (1 - \varepsilon) \cdot (\rho_{GP} - \rho_{II}) \cdot g, \quad (4.54)$$

де ρ_{II} – густина повітря, $кг/м^3$;

g – прискорення сили тяжіння, $м/с^2$.

Гідравлічний опір киплячого шару визначається як відношення ваги частинок до площі поперечного перерізу апарата:

$$\Delta P = \frac{G_{GP}}{S} = h \cdot (1 - \varepsilon) \cdot (\rho_{GP} - \rho_{II}) \cdot g. \quad (4.55)$$

За рівнянням (4.55) визначається гідравлічний опір сухого шару гранул. У випадку капсулювання, коли гранули карбаміду зрошуються суспензією курячого посліду, слід використовувати залежність (3.3).

Визначення висоти і порізності киплячого шару.

Об'єм твердих частинок є постійним в обох станах шару:

$$V_{GP} = V_0 \cdot (1 - \varepsilon_0) = V \cdot (1 - \varepsilon). \quad (4.56)$$

Тоді ступінь розширення шару розраховується як:

$$\frac{V}{V_0} = \frac{(1 - \varepsilon_0)}{(1 - \varepsilon)}. \quad (4.57)$$

Для апарата з постійним поперечним перерізом з урахуванням (4.51) рівняння (4.57) переписується у вигляді:

$$\frac{S \cdot h}{S \cdot h_0} = \frac{(1 - \varepsilon_0)}{(1 - \varepsilon)}. \quad (4.58)$$

Висота киплячого шару:

$$h = h_0 \cdot \frac{(1 - \varepsilon_0)}{(1 - \varepsilon)}. \quad (4.59)$$

Порізність киплячого шару визначається за допомогою емпіричної залежності [84]:

$$\varepsilon = \left(\frac{18 \cdot Re + 0,36 \cdot Re^2}{Ar} \right)^{0,21}, \quad (4.60)$$

де Re – критерій Рейнольдса;

Ar – критерій Архімеда.

Визначення швидкості початку псевдозрідження.

Швидкість початку псевдозрідження (або перша критична швидкість) – це така швидкість повітря, за якої зернистий шар переходить у зважений стан, тобто коли починається витання найбільших часток. Для її розрахунку використовують узагальнені емпіричні залежності.

Критичне значення критерію Рейнольдса, при якому починається псевдозрідження, знаходиться за рівнянням [112]:

$$Re_{1KP} = \frac{Ar}{1400 + 5,22 \cdot \sqrt{Ar}}. \quad (4.61)$$

У критерій Архімеда входять всі відомі величини:

$$Ar = \frac{d_{ГР}^3 \cdot \rho_{П} \cdot g \cdot (\rho_{ГР} - \rho_{П})}{\mu_{П}^2}, \quad (4.62)$$

де $d_{ГР}$ – діаметр частинок, м;

$\mu_{П}$ – динамічна в'язкість, Па·с.

Перша критична швидкість:

$$w_{1КР} = \frac{Re_{1КР} \cdot \mu_{П}}{d_{ГР} \cdot \rho_{П}}. \quad (4.63)$$

Визначення швидкості уносу.

Швидкість уносу (або друга критична швидкість) характеризується такими умовами:

- розширення шару досягло межі ($\varepsilon=1$) і рух окремих частинок не залежить від присутності сусідніх частинок;
- частинки не осідають і не уносяться потоком, а вільно витають – незначне перевищення швидкості повітря над швидкістю витання призводить до уносу частинки.

Критерій Рейнольдса для граничного розширення шару ($\varepsilon=1$) [112]:

$$Re_{2КР} = \frac{Ar}{18 + 0,61 \cdot \sqrt{Ar}}. \quad (4.64)$$

Критерій Архімеда визначається за рівнянням (4.62).

Друга критична швидкість:

$$w_{2КР} = \frac{Re_{2КР} \cdot \mu_{П}}{d_{ГР} \cdot \rho_{П}}. \quad (4.65)$$

Визначення робочої швидкості та витрати повітря.

Робоча швидкість повітря:

$$w_P = K \cdot w_{1KP}, \quad (4.66)$$

де K – число псевдозрідження.

Число псевдозрідження залежить від: форми частинок, форми апарата, конструкції газорозподільної решітки тощо [70]. Його визначення базується на підставі аналізу дослідних даних і для лабораторних умов ведення процесу рекомендується вибирати значення в інтервалі від 3 до 7.

Витрата повітря визначається за рівнянням:

$$Q = w_P \cdot S. \quad (4.67)$$

Визначення маси зернистого матеріалу в апараті.

Для періодичного процесу максимальна маса разового завантаження гранул становить:

$$M_{GP} = S \cdot H \cdot (1 - \varepsilon) \cdot \rho_{GP}. \quad (4.68)$$

Визначення витрати органічної суспензії.

Враховуючи оптимальний час нанесення органічної оболонки (30-40 хв), для шару матеріалу, склад якого є близьким до монодисперсного, із рівняння (4.17) подача суспензії визначиться:

$$G_C = \frac{\left[\left(\frac{\delta}{k \cdot R_0} + 1 \right)^3 - 1 \right] \cdot \rho_{OB} \cdot M_{GP}}{\rho_{GP} \cdot \tau \cdot x_{мс}}. \quad (4.69)$$

Інтенсивність зрошення суспензією курячого посліду у випадку капсулювання полідисперсного гранул карбаміду найбільш точно можна розрахувати, використовуючи залежність (3.8).

Кінцева температура гранул

Попередньо визначається тривалість прогріву (час сушіння) $\tau_{ПР}$ частинки до заданої температури за залежністю (4.49). Визначення температури твердих частинок проводиться за рівнянням (4.37). Розраховане значення t_K повинно бути більшим або дорівнювати температурі прогріву гранули $t_{ПР}$ сушильним агентом до закінчення процесу випаровування вологи з плівки суспензії: $t_K \geq t_{ПР}$. Останню можна визначити з виразу (4.50).

На підставі розробленого алгоритму були розраховані основні технологічні параметри процесу покриття гранул мінеральних добрив органічною суспензією в апараті киплячого шару (таблиця 4.1).

Таблиця 4.1 – Розрахункові технологічні параметри процесу покриття гранул мінеральних добрив органічною суспензією в апараті киплячого шару

ПАРАМЕТР	ЗНАЧЕННЯ
Маса гранул в апараті, кг	0,5
Лінійний розмір (діаметр) гранул, мм	2
Товщина оболонки, мм	0,3
Робоча швидкість повітря, м/с	4,8
Гідравлічний опір дисперсного шару, Па	610
Час проведення процесу, хв	40
Витрата органічної суспензії, мл/хв	28,2
Температура шару дисперсного матеріалу, °С	65

Висновки до четвертого розділу

1. Отримано теоретичні залежності для визначення товщини органічної оболонки (4.17) та швидкості росту гранул (4.19).
2. Визначено оптимальний час нанесення органічної оболонки, який становить 30-40 хвилин.
3. Розроблено математичну модель процесу покриття гранул мінеральних добрив органічною суспензією, яка враховує зміну щільності розподілу гранул за розміром.
4. Теоретичні розрахунки були підтверджені результатами експериментальних досліджень, тобто розроблена математична модель може бути застосована для розрахунку процесу капсулювання мінеральних гранул органічною оболонкою в киплячому шарі.
5. Розроблено методику розрахунку процесу покриття гранул мінеральних добрив органічною суспензією.

Основні результати опубліковано в наступних працях [111, 113-115].

РОЗДІЛ 5

ДОСЛІДЖЕННЯ ОСНОВНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ ГРАНУЛ КАРБАМІДУ ПОКРИТИХ КУРЯЧИМ ПОСЛІДОМ

5.1 Експериментальні дослідження статичної міцності гранул

Статична міцність є технологічним показником гранульованого продукту. Таким чином, необхідно визначити дійсну величину статичної міцності отриманих гранул і порівняти її зі стандартизованими значеннями для карбаміду (таблиця 5.1).

Таблиця 5.1 – Статична міцність гранул карбаміду [95]

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

За допомогою штангенциркуля було відібрано дві фракції гранул з різними товщинами оболонки. Із кожної фракції пінцетом відбирали по 20 гранул, форма яких найбільш наближена до сферичної (рисунок 5.1), і зважували, щоб вологість гранул в процесі випробування не змінилась.

Методика визначення дійсної величини статичної міцності гранул детально описана в розділі 2.

Як це видно з рисунка 5.2, нанесене на гранули карбаміду покриття у вигляді сухого курячого посліду збільшує її статичну міцність. Відтак, якщо органічна оболонка складає 35 % мас., то статична міцність гранули зростає удвічі (2,75 $МПа$), а при 50 % мас. – майже втричі (4,1 $МПа$).

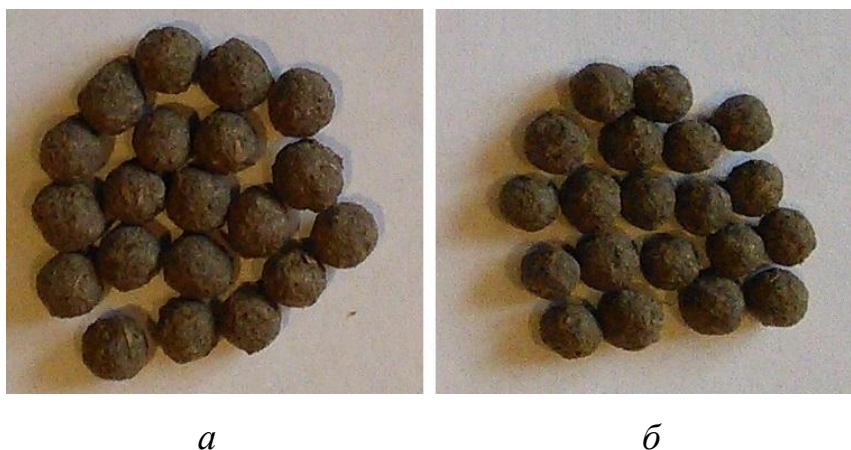


Рисунок 5.1 – Органо-мінеральні гранули з товщиною органічної оболонки:
a – 50 % мас.; *б* – 35 % мас.

Результати тестових досліджень приведені на рисунку 5.2.

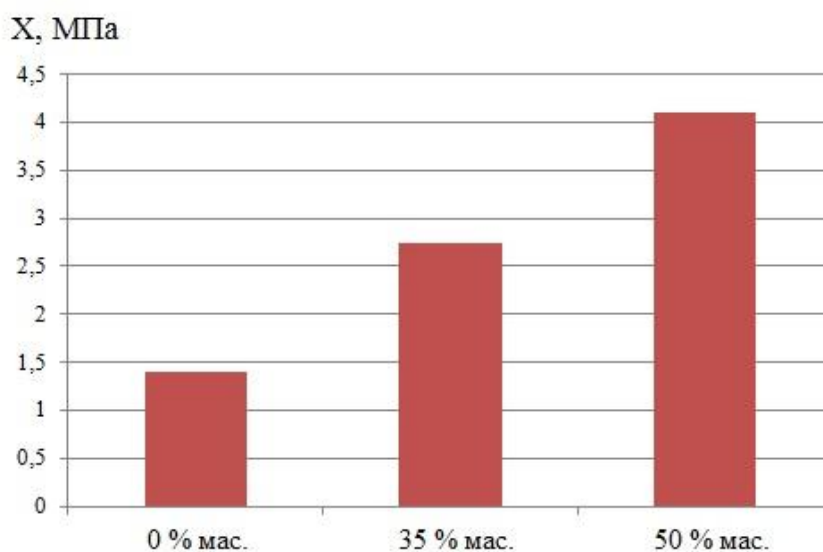


Рисунок 5.2 – Статична міцність гранул при відповідній частці органічної оболонки

5.2 Експериментальні дослідження проникності органічної оболонки

При розробці та виготовленні повільнодіючих мінеральних добрив необхідно враховувати критерії оцінювання їх ефективності. Згідно європейських норм, обов'язковими умовами є [103, 104]:

- 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 були проведені експериментальні дослідження вивільнення активного компонента з-під захисної оболонки, методика яких детально описана в розділі 2.

Результати тестових досліджень гранул карбаміду, покритих курячим послідом, наведені на рисунку 5.3.

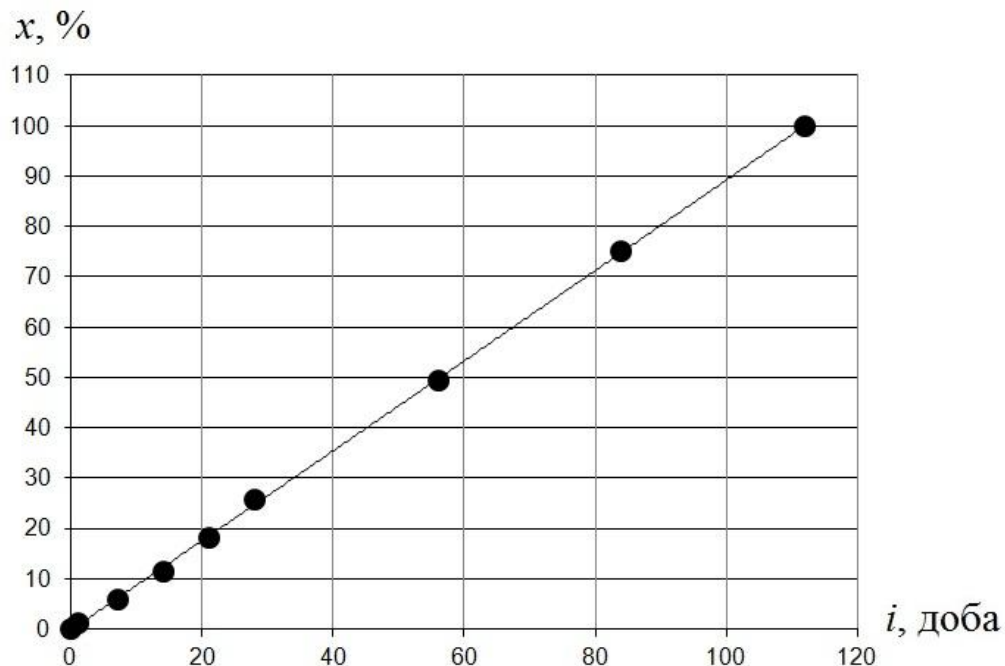


Рисунок 5.3 – Зміна кількості розчиненого цільового компонента в часі (середня розчинення – вода)

Автор [89] у якості матеріалу захисної оболонки використовує композицію на основі палигорськіту та меляси бурякової із співвідношенням 5:4. У цьому випадку, на початковій стадії розчинення, динаміка вивільнення цільового компонента має лінійний характер. Через деякий час відбувалося

порушення цілісності захисної оболонки, що супроводжувалося різким збільшенням інтенсивності вивільнення.

Як це видно з рисунка 5.3, у випадку використання в якості захисної оболонки сухого курячого посліду, динаміка вивільнення цільового компонента має лінійний характер на всьому етапі розчинення. Цей факт доводить відсутність процесу механічного руйнування захисної оболонки у результаті її розчинення. А це дозволяє отримувати більш якісні добрива з пролонгованою дією.

5.3 Установа для покриття гранул мінеральних добрив органічною суспензією

У першу чергу слід зазначити, що підприємствам, які займаються виробництвом гранульованих мінеральних добрив, не буде проблемним перенацілити свою продукцію на отримання гранульованого органічно-мінерального добрива пролонгованої дії. Для цього необхідно діючу технологічну схему виробництва дооснастити додатковим блоком з апаратом киплячого шару.

Отже, нашим завданням було: на підставі результатів теоретичних та експериментальних досліджень розробити установку для капсулювання мінеральних добрив, яка враховує фізико-хімічні особливості використовуваних речовин.

На рисунку 5.4 зображено структурну схему блоку покриття гранул мінеральних добрив суспензією курячого посліду.

Установа працює наступним чином. Попередньо, курячий послід проходить стадію подрібнення у млині 2. Отримана гомогенна маса накопичується в ємності 4, яка обладнана перемішуючим пристроєм. Далі, за допомогою насоса 5, суспензія курячого посліду потрапляє в мірний бачок 6, який також оснащений перемішуючим пристроєм.

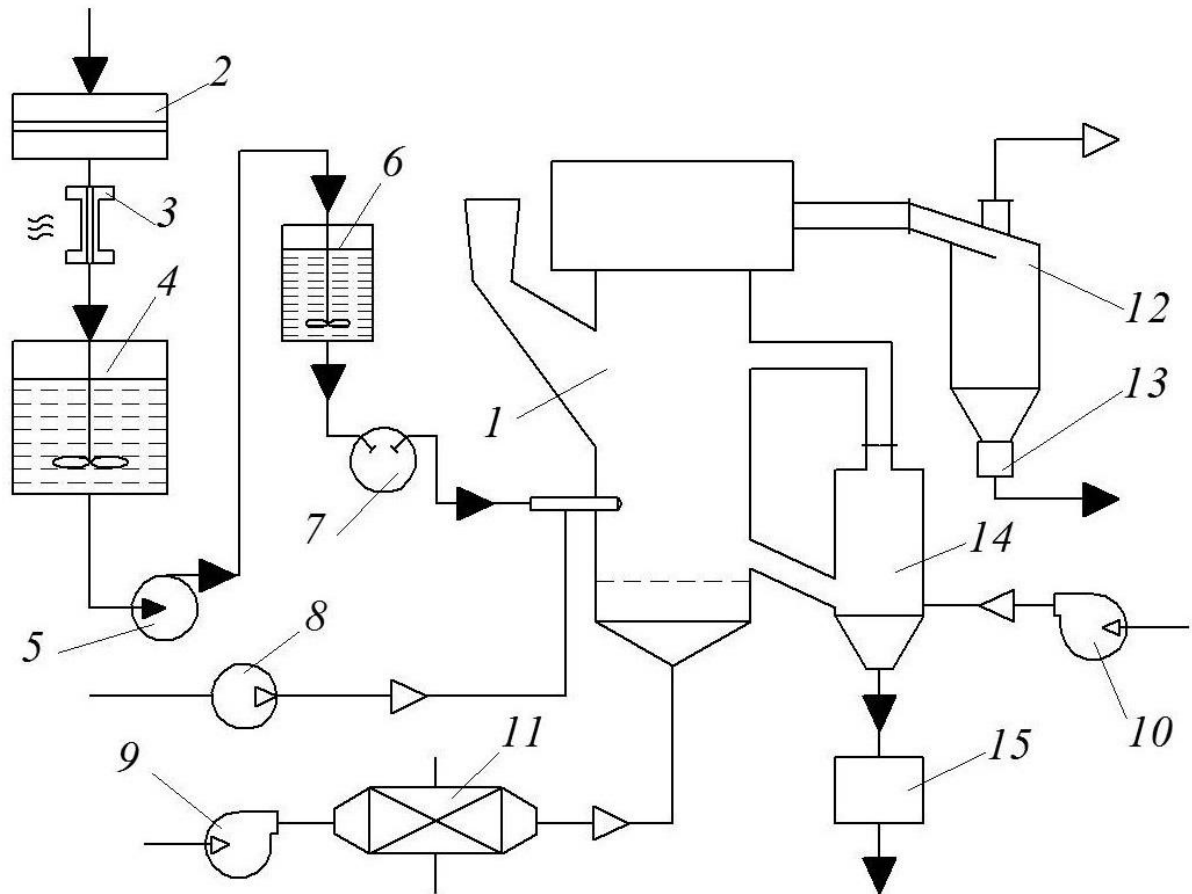


Рисунок 5.4 – Структурна схема блоку покриття гранул мінеральних добрив суспензією курячого посліду: 1 – апарат киплячого шару; 2 – дисковий млин; 3 – кавітатор; 4 – ємність робочої речовини; 5 – насос; 6 – мірний бачок; 7 – насос-дозатор; 8 – компресор; 9, 10 – газодувка; 11 – калорифер; 12 – циклон; 13 – збірник пилу; 14 – сепаратор; 15 – збірник гранул

Безпосередньо, покриття гранул шаром органічної речовини відбувається в робочій камері апарату 1. Під газорозподільну решітку, через калорифер 11, подається гаряче повітря у кількості, що забезпечує стійкий киплячий шар гранул. На пневмофорсунку насосом 7 дозовано подається підготовлена органічна маса. Розпилення суспензії у киплячий шар здійснюється пневмофорсункою за допомогою компресора 8.

Потоком гарячого повітря гранули закидаються в зону зрошення, де покриваються мокрою оболонкою: рідина випаровується, а органіка підсихає, утворюючи щільний шар на поверхні гранули. Далі процес багаторазово

повторюється, і розмір гранул постійно збільшується за рахунок сухого органічного шару.

З рівня решітки організовується постійний відбір гранул. Відібрані гранули потрапляють у сепаратор 14, в якому відбувається пневмосепарація за допомогою газодувки 10: дрібні гранули по трубопроводу повертаються в киплячий шар на дорощування, а великі – виводяться з процесу і накопичуються у збірнику 15.

Таким чином, під час роботи установки можна виділити три зони: 1 – зона сушіння гранул; 2 – зона зрошення гранул органічною суспензією; 3 – зона сепарації гранул.

Екологічність роботи установки забезпечується роботою циклона 12, в якому відбувається очищення відпрацьованого повітря від пилу. Останній накопичується у збірнику 13, а очищене повітря виводиться за межі установки.

Послід птахів у великій кількості містить патогенну та умовно-патогенну мікрофлору та яйця гельмінтів: бактерії групи кишкових паличок – 10^4 - 10^6 , ентерококи – 10^6 , стафілококи – 10^{10} - 10^{12} , клостридії – 10^3 - 10^4 , сальмонели, яйця гельмінтів. Крім того, необроблений послід може бути фактором передачі понад 100 інфекційних і паразитарних захворювань (бруцельоз, туберкульоз тощо).

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 5.4), 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, який був розроблений під керівництвом академіка Вершиніна М.П. та отримав назву «Пристрій

активізації процесів» (ПАП) [116, 117]. Основним принципом роботи ПАП є вплив електромагнітного поля високої потужності на рідкі речовини, що супроводжується локальним зниженням тиску в оброблюваній рідині за рахунок збільшення відносної швидкості. Процес йде у проточному режимі.

По суті, розроблений пристрій (рисунок 5.5) – це труба, в яку з одного кінця втікає послід та починає обертатися і вібрувати у вихорі електромагнітних сил. Як наслідок цього, виділяються бульбашки газів, а також проявляються дії, які активізують усі хімічні та фізичні процеси. Завдяки цьому, з іншого кінця труби вже витікає гомогенізована маса без запаху та отруйної кислотності.

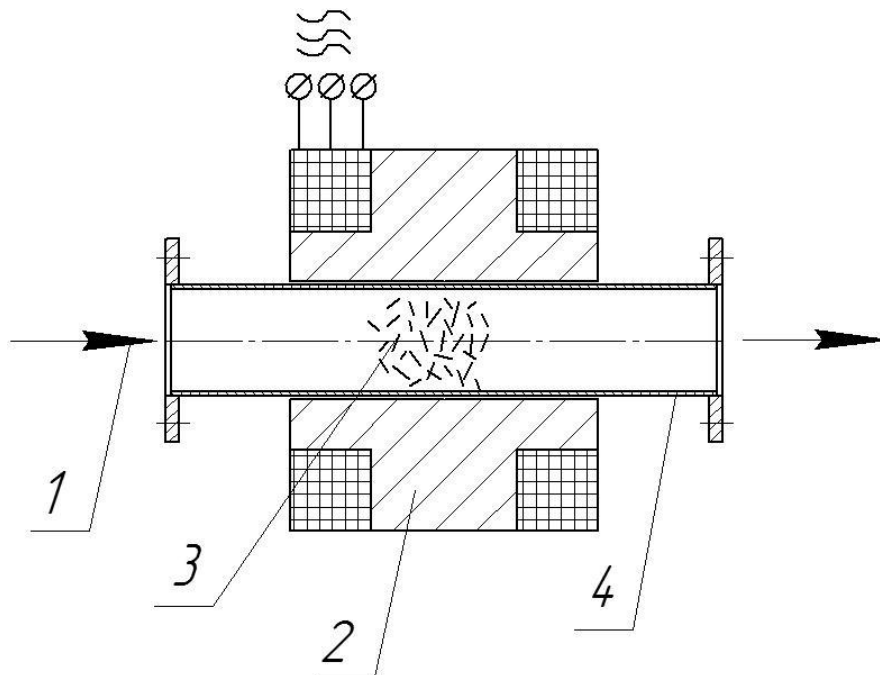


Рисунок 5.5 – Принципова схема пристрою з обертовим електромагнітним полем: 1 – потік оброблювальної речовини; 2 – електромагнітний індуктор; 3 – феромагнітні голки; 4 – робоча зона апарата

На підставі проведеного літературно-патентного огляду [116-126], пропонується удосконалення потокової схеми капсулювання мінеральних гранул (рисунок 5.4) за рахунок оснащення її кавітатором 3 (рисунок 5.6).



Рисунок 5.6 – Зовнішній вигляд кавітатора

Принцип дії кавітатора полягає у наступному. Потік текучого середовища (рідкого курячого посліду) подається через завантажувальний бункер. Під дією електромагнітних сил в оброблюваній суспензії йде зародження гідродинамічних коливань, які призводять до виникнення парогазових бульбашок – виникає кавітація. Період життя кавітаційних бульбашок $\sim 10^{-6}$ с, після чого вони лопаються, що супроводжується виділенням великих імпульсів енергії: відбувається різке локальне підвищення температури та виникнення ударних хвиль. 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 до п'ятого розділу

1. На підставі проведених тестових досліджень виявлено, що нанесена на поверхню мінеральних гранул органічна оболонка у кількості 50% мас.

підвищує статичну міцність гранули майже втричі, і найголовніше, отриманий продукт може застосовуватися як добриво пролонгованої дії з терміном вивільнення 3-4 місяці.

2. Враховуючи специфічні властивості матеріалу оболонки, розроблено схему установки для покриття гранул мінеральних добрив суспензією курячого посліду.

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 гранул.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Мосолов И.В. Физиологические основы применения минеральных удобрений / И.В. Мосолов. – М.: Колос, 1979. – 255 с.
2. Забелешинский Ю.А. Эффективность производства и применения минеральных удобрений / Ю.А. Забелешинский, Н.С. Корогодов, Э.И. Цыпина. – М.: Химия, 1980. – 272 с.
3. Петербургский А.В. Минеральные удобрения / А.В. Петербургский, А.П. Смирнов. – М.: Росагропромиздат, 1989. – 95 с.
4. Господаренко Г.М. Основи інтегрованого застосування добрив / Г.М. Господаренко. – К.: ЗАТ НІЧЛАВА, 2002. – 344 с.
5. Огліх В.В. Виробництво і застосування мінеральних добрив як вагомий фактор підвищення врожайності / В.В. Огліх // Економіка АПК. – 2012. – №2. – С. 38-43.
6. Агрохімічне обслуговування сільськогосподарських формувань: навчальний посібник / В.І. Лопушняк, І.О. Корчинський, М.М. Вислободська [та ін.]. – Львів: Новий Світ-2000, 2009. – 288 с.
7. Кидин В.В. Органические удобрения: учебное пособие / В.В. Кидин. – Москва: РГАУ-МСХА им. К.А. Тимирязева, 2012. – 166 с.
8. Мартиненко В.М. Органічні добрива в землеробстві Сумщини / В.М. Мартиненко, В.В. Голоха, В.П. Іванов. – Суми: Мрія, 2006. – 23 с.
9. Аксентюк В.А. Натуральные виды удобрений / В.А. Аксентюк // Настоящий хозяин. – 2008. – №10. – С. 21-26.
10. Чеботько К.О. І економіка, і екологія / К.О. Чеботько, Л.В. Войтенко, В.Є. Косматий, В.П. Бородай // Сучасне птахівництво. – 2011. – №5-6 (102-103). – С. 8-11.
11. Чеботько К.О. Биокomпастирование отходов птицеводства / К.О. Чеботько, Л.В. Войтенко, В.Е. Косматый, В.П. Бородай // Сучасне птахівництво. – 2011. – №7-8 (104-105). – С. 12-15.

12. Наткіна Н. Мінеральні добрива негативно впливають на довкілля / Н. Наткіна // Фермерське господарство. – 2010. – №18 (482). – С. 15.
13. Минеев В.Г. Химизация земледелия и природная среда / В.Г. Минеев. – М.: Агропромиздат, 1990. – 287 с.
14. Классен П.В. Основы техники гранулирования (Процессы и аппараты химической и нефтехимической технологии) / П.В. Классен, И.Г. Гришаев. – М.: Химия, 1982. – 272 с.
15. Классен П.В. Гранулирование / П.В. Классен, И.Г. Гришаев, И.П. Шомин. – М.: Химия, 1991. – 240 с.
16. Кочетков В.Н. Гранулирование минеральных удобрений / В.Н. Кочетков. – М.: Химия, 1975. – 224 с.
17. Процессы гранулирования в промышленности / Н.Г. Вилесов, В.Я. Скрипко, В.Л. Ломазов, И.М. Танченко. – К.: Техніка, 1976. – 192 с.
18. Казакова Е.А. Гранулирование и охлаждение азотсодержащих удобрений / Е.А. Казакова. – М.: Химия, 1980. – 288 с.
19. Овчинников Л.Н. Грануляция минеральных удобрений во взвешенном слое: монография / Л.Н. Овчинников. – Иваново: ГОУ ВПО Иван. гос. хим.-технол. ун-т, 2010. – 168 с.
20. Агрохімічне обслуговування сільськогосподарських формувань: навчальний посібник / В.І. Лопушняк, І.О. Корчинський, М.М. Вислободська [та ін.] – Львів: Новий Світ-2000, 2009. – 288 с.
21. Скрильник Є. Органо-мінеральні добрива: перспективи їхнього застосування / Є. Скрильник // Пропозиція. – 2010. – №12 – С. 68-70.
22. Комаров А.А. Роль гидролизного лигнина в плодородии почв и питании растений: дис. ... д-ра сельскохозяйственных наук: 06.01.03 / А.А. Комаров. – Санкт-Петербург, 2004. – 383 с.
23. Jarchow M. E. Nitrogen fertilization increases diversity and productivity of prairie communities used for bioenergy / M. E. Jarchow, M. Liebman // GCB Bioenergy. – 2013. – Vol. 5. – P. 281-289.

24. Galichechi S. Nitrogen fertilizer the effects on growing potato / S. Galichechi, M. Gashti azar // *Journal of Biology and today's world*. – 2013. – Vol. 2. – P. 335-338.
25. Khiari L. Phosphorus transformations in acid light-textured soils treated with dry swine manure / L. Khiari, L.-E. Parent // *Canadian Journal of Soil Science*. – 2005. – Vol. 85. – P. 75-87.
26. Пат. 43789 Україна, МПК C05G5/00. Гранульоване мінеральне добриво / С.М. Абрамов, М.С. Абрамова; власник С.М. Абрамов, М.С. Абрамова. – №u200904604; заявл. 08.05.2009; опубл. 25.08.2009.
27. Нагурський О.А. Закономірності капсулювання речовин у стані псевдозрідження та їх дифузійного вивільнення: монографія / О.А. Нагурський. – Львів: Видавництво Львівської політехніки, 2012. – 188 с.
28. Овчинников Л.Н. Капсулирование минеральных удобрений во взвешенном слое: монография / Л.Н. Овчинников, А.Г. Липин. – Иваново: Иван. гос. хим.-технол. ун-т, 2011. – 140 с.
29. Зайцев А.И. Оборудование для нанесения оболочек на зернистые материалы / А.И. Зайцев, В.Н. Сидоров, Д.О. Бытев. – М.: 1997. – 272 с.
30. Солодовник В.Д. Микрокапсулирование / В.Д. Солодовник. – М.: Химия, 1980. – 216 с.
31. Одинцов А.В. Капсулирование гранул минеральных удобрений в композиционные оболочки: дис. ... канд. техн. наук: 05.17.08 / А.В. Одинцов. – Иваново, 2010. – 130 с.
32. Бубнов В.Б. Непрерывный процесс получения водорастворимых полимеров на основе (мет)акриламида: дис. ... канд. техн. наук: 05.17.08 / В.Б. Бубнов. – Иваново, 2000. – 211 с.
33. Полиакриламид / Л.И. Абрамова [и др.]. – М.: Химия, 1992. – 192 с.
34. Кондратов А.П. Капсулирование в полимерных пленках / А.П. Кондратов, А.Н. Громов, В.Н. Манин. – М.: Химия, 1990. – 192 с.

35. Нагурський О.А. Капсульовані мінеральні добрива. Кінетика вивільнення компонентів із полідисперсних сумішей / О.А. Нагурський // Хімічна промисловість України. – 2012. – №3 (110). – С. 69-73.
36. Таран А.Л. Эффективные технологии капсулирования гранул азотсодержащих удобрений / А.Л. Таран // Химическая промышленность сегодня. – 2003. – №7. – С. 5-10.
37. Гумницкий Я.М. Массоперенос из твердой фазы через нерастворимую полимерную оболочку / Я.М. Гумницкий, И.М. Федин, К.Ф. Аль-Алуси // Теоретические основы химической технологии. – 1992. – Т. 26, вып. 4. – С. 510-515.
38. Демчук И.Я. Массоперенос из твердой шарообразной частицы, покрытой нерастворимой полимерной оболочкой / И.Я. Демчук, О.А. Нагурский, Я.М. Гумницкий // Журнал Теоретические основы химической технологии. – 1997. – Т.31. – №4. – С. 380-383.
39. Кувшинников И.М. Минеральные удобрения и соли. Свойства и способы их улучшения / И.М. Кувшинников. – М.: Химия, 1987. – 256 с.
40. Пат. 2038347 Российская Федерация, МПК C05G3/04. Способ получения капсулированного медленнодействующего минерального удобрения / Ш.Н. Гимадеев; заявитель и патентообладатель Ш.Н. Гимадеев. – №5013216/26; заявл. 25.11.1991; опубл. 27.06.1995.
41. Пат. 2038346 Российская Федерация, МПК C05G3/00, B01J2/02. Способ получения водостойчивых гранул / А.Л. Таран [и др.]; заявители Государственный научно-исследовательский и проектный институт азотной промышленности и продуктов органического синтеза, Московский институт тонкой химической технологии им. М.В. Ломоносова; патентообладатель Государственный научно-исследовательский и проектный институт азотной промышленности и продуктов органического синтеза. – №4853020/26; заявл. 24.07.1990; опубл. 27.06.1995.
42. Пат. 2023710 Российская Федерация, МПК C05G1/02. Способ получения медленнодействующих удобрений / С.В. Кирпиков [и др.]; заявители

- Научно-исследовательский физико-химический институт им. Л.Я. Карпова, Московский институт тонкой химической технологии им. М.В. Ломоносова; патентообладатель Научно-исследовательский физико-химический институт им. Л.Я. Карпова. – №4896622/26; заявл. 26.12.1990; опубл. 30.11.1994.
43. Пат. 2212134 Российская Федерация, МПК А01N25/08, А01N25/10, С05G3/00. Удобрения с предварительным покрытием и контролируемым высвобождением и способ их получения / Джонсон Вильям Р. (US), Гоерц Харви М. (US), Тиммонс Ричард Дж. (US); заявитель и патентообладатель ОМС ИНВЕСТМЕНТС, ИНК. (US). – №2000105279/13; заявл. 09.06.1999; опубл. 20.01.2003.
44. Пат. 2162832 Российская Федерация, МПК С05С1/02, В01J2/30, С05F7/00, С05G1/00. Способ получения неслеживаемых органоминеральных удобрений пролонгированного действия / О.К. Семакина [и др.]; заявитель и патентообладатель Томский политехнический университет. – №98105443/12; заявл. 16.03.1998; опубл. 10.02.2001.
45. Пат. 2200723 Российская Федерация, МПК С05G3/04, С05F11/08. Способ получения минерально-органического удобрения пролонгированного действия / А.Ю. Винаров [и др.]; заявитель и патентообладатель А.Ю. Винаров. – №2001135079/12; заявл. 27.08.2002; опубл. 20.03.2003.
46. Пат. 2429864 Российская Федерация, МПК А61К35/407, А61К9/50, А61P1/16, А61P3/10, А61P25/00, А61P37/04. Система инкапсуляции / А. Васконселлос (US) [и др.]; заявитель и патентообладатель Ливинг Селл Продактс ПТИ Лимитед (AU). – №2008120025/15; заявл. 24.10.2006; опубл. 27.09.2011.
47. Пат. 2396237 Российская Федерация, МПК С05G3/00, С05G5/00, В01J13/00. Инкапсулированная частица / Дональд Чарльз Менте (US); заявитель и патентообладатель БАСФ КОРПОРЕЙШН (US). – №2006145856/15; заявл. 11.05.2005; опубл. 10.08.2010.
48. Авторское свидетельство СССР №532596, кл. С05В19/00, 1976.

49. Патент США №3264082, кл. 71-64, 1966.
50. Патент Японии №16770/72, кл. 4A2 13/17.
51. Pat. 5215752 United States, IPC A61K9/16, A61K9/20. Pharmaceutical tablets and capsule granulates of scleroglucan and active substance / Lovrecich Mara L. [and other]; owner Vectorpharma International S.p.A. – №07/746230; fil. 12.08.1991; publ. 01.07.1993.
52. Pat. 20080111269 United States, IPC A61K9/14, B27N3/00. Granules, tablets and granulation / G. Politi, E. Heilakka; owner G. Politi, E. Heilakka. – №11/979530; fil. 05.11.2007; publ. 15.05.2008.
53. Муштаев В.И. Конструирование и расчет аппаратов со взвешенным слоем: Учебное пособие для вузов / В.И. Муштаев, А.С. Тимонин, В.Я. Лебедев. – М: Химия, 1991. – 344 с.
54. Расчеты аппаратов кипящего слоя: Справочник / Под ред. И.П. Мухленова, Б.С. Сажина, В.Ф. Фролова. – Л.: Химия, 1986. – 352 с.
55. Гельперин Н.И. Основы техники псевдоожижения / Н.И. Гельперин, В.Г. Айнштейн, В.Б. Кваша. – М.: Химия, 1967. – 664 с.
56. Davidson J.F. Fluidization / J.F. Davidson, D. Harrison. – London: Department of Chemical Engineering University of Cambridge, 1971. – 728 p.
57. Демчук И.А. Разработка технологии и моделирования процессов капсулирования твердых лекарственных форм в псевдоожиженном слое: дис. ... канд. техн. наук: 05.17.08 / И.А. Демчук. – Львов, 1991. – 203 с.
58. Mathur K.B. Spouted beds / K.B. Mathur, N. Epstein. – Vancouver: Department of Chemical Engineering University of British Columbia, 1974. – 288 p.
59. Гельперин Н.И. Основы техники псевдоожижения / Н.И. Гельперин, В.Г. Айнштейн. – М.: Химия, 1964. – 288 с.
60. Рощин Н.И. Псевдоожижение в производстве лекарств. – М.: Медицина, 1981. – 288 с.
61. Кикалишвили О.И. Обезвоживание и грануляция в аппарате фонтанирующего слоя с дополнительным боковым вводом теплоносителя:

- автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.17.08 / О.И. Кикалишвили. – Москва, 1984. – 20 с.
62. Обезвоживание растворов в кипящем слое / О.М. Годес, Ю.Я. Каганович, С.П. Налимов [и др.]. – М.: Металлургия, 1973. – 288 с.
63. Кунии Д. Промышленное псевдооживление / Д. Кунии, О. Левеншпиль. – М.: Химия, 1976. – 448 с.
64. Апарати завислого шару. Теоретичні основи і розрахунок / М.П. Юхименко, С.В. Вакал, М.П. Кононенко, А.П. Філонов. – Суми: Собор, 2003. – 304 с.
65. Дубровский В.С. Метановое сбраживание сельскохозяйственных отходов / В.С. Дубровский, У.Э. Виестур. – Рига: Зинатие, 1988. – 202 с.
66. Якушко С.І. Технологічні особливості гранулювання органічної суспензії у киплячому шарі / С.І. Якушко // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Збірник наукових праць. – Харків: НТУ «ХПІ». – 2011. – №34. – С. 52-59.
67. Лыков А.В. Тепломассообмен: Справочник / А.В. Лыков. – М.: Энергия, 1972. – 560 с.
68. Лыков А.В. Теория теплопроводности / А.В. Лыков. – М.: Высшая школа, 1967. – 599 с.
69. Лыков А.В. Теория сушки / А.В. Лыков. – М.: Энергия, 1968. – 472 с.
70. Касаткин А.Г. Основные процессы и аппараты химической технологии / А.Г. Касаткин. – М.: Химия, 1971. – 784 с.
71. Иванов В.Е. Сушка дисперсных материалов в сушилке кипящего слоя непрерывного действия: автореф. ... дис. канд. техн. наук: 05.17.08 / В.Е. Иванов. – Иваново, 2010. – 16 с.
72. Мальований М.С. Тепломасообмін процесу капсулювання мінеральних добрив водним розчином плівкоутворюючої композиції палигорськіт-меляса / М.С. Мальований, О.А. Нагурський, В.Я. Бунько, В.М. Друзюк // Вісник Кременчуцького НУ ім. Михайла Остроградського. – 2012. – №2 (74). – С. 117-120.

73. Нагурський О.А. Методика визначення температурних показників процесу капсулювання дисперсних матеріалів в стані псевдозрідження / О.А. Нагурський, А.Я. Сороківський // Вісник Нац. ун-ту «Львівська політехніка». – 2009. – №644. – С. 180-185.
74. Нагурський О.А. Математична модель теплообміну процесу капсулювання дисперсного матеріалу в стані псевдозрідження / О.А. Нагурський, Я.М. Гумницький // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2010. – №6/6 (48). – С. 74-77.
75. Barna I. Intradiffusion mass transfer during drying of slag gravel raw granule / I. Barna, Y. Gumnytskyi, V. Atamanyuk // Chemistry & Chemical Technology. – 2013. – Vol. 7, №4. – P. 461-465.
76. Барна І.Р. Зовнішній тепломасообмін під час фільтраційного сушіння сировинних матеріалів виробництва шлакового гравію / І.Р. Барна, В.М. Атаманюк // Хімічна промисловість України. – 2012. – № 3. – С. 21-27.
77. Барна І.Р. Тепломасообмін під час фільтраційного сушіння сирцевих гранул шлакового гравію / І.Р. Барна, В.М. Атаманюк, , І.Я. Матківська // Вісник НТУ «ХП». Збірник наукових праць. Тематичний випуск: Хімія, хімічна технологія та екологія. – 2012.– № 17. – С. 146-152.
78. Юхименко Н.П. Межфазный теплообмен и разграничение стадий теплопереноса при охлаждении зернистых материалов во взвешенном слое / Н.П. Юхименко // Вісник Сумського державного університету. Серія: Технічні науки. – 2007. – № 2. – С. 52-56.
79. Барна І.Р. Гідродинаміка і тепломасообмін під час фільтраційного сушіння сировинних матеріалів виробництва шлакового гравію: дис. ... канд. техн. наук: 05.17.08 / І.Р. Барна. – Львів, 2013. – 151 с.
80. Волков В.Ф. Тепломассоперенос при грануляции и сушке растворов в псевдооживленном слое / В.Ф. Волков, И.И. Шишко, Л.В. Хохлова // В сб.: Тепло- и массоперенос. – 1968. – т. 5. – С. 248-251.
81. Lee B.S. Kinetics of particle growth in a fluidized canciner / B.S. Lee, J.J. Chu, A.A. Jonke // AIChE Journal. – 1962. – V. 8. – № 1. – P. 53-58.

82. Grimmett E.S. Kinetics of particle growth in the fluidized bed calcinations process / E.S. Grimmett // *AICHE Journal*. – 1964. – V. 10. – № 5. – P. 717-722.
83. Кувшинова А.С. Исследование процесса капсулирования гранулированных материалов в водорастворимые полимерные оболочки / А.С. Кувшинова, А.Г. Липин // *Материалы III Всероссийской научной конференции «Химия и химическая технология на рубеже тысячелетий»*. – Томск: ТПУ, 2004. – С. 282-283.
84. Кафаров В.В. Математическое моделирование основных процессов химических производств: учеб. пособие для вузов / В.В. Кафаров, М.Б. Глебов. – М.: Высш. шк., 1991. – 400 с.
85. Одинцов А.В. Расчет гранулометрического состава продукта при нанесении гетерофазной оболочки / А.В. Одинцов, А.Г. Липин, А.С. Кувшинова // *Сб. трудов XXII международной научной конференции «Математические методы в технике и технологиях – ММТТ-22»*. – Псков, 2009. – Т. 9, секция 10. – С. 147-148.
86. Одинцов А.В. Прогнозирование гранулометрического состава при получении двухслойных гранул / А.В. Одинцов, А.Г. Липин // *Известия вузов. Химия и химическая технология*. – 2010. – Т. 53, вып. 5. – С. 120-122.
87. Kornienko Y. Mathematical modeling of continuous formation of multilayer humic-mineral solid composites / Y. Kornienko, R. Sachok, V. Rayda, O. Tsepka // *Chemistry & Chemical Technology*. – 2009. – Vol. 4. – P. 335-338.
88. Нагурський О.А. Особливості капсулювання гранульованих мінеральних добрив в апаратах киплячого шару / О.А. Нагурський, М.С. Мальований, В.Я. Бунько // *Хімічна промисловість України*. – 2012. – №5. – С. 55-58.
89. Бунько В.Я. Тепломасообмін процесів отримання та використання мінеральних добрив, капсульованих водною суспензією плівкоутворювача: дис. ... канд. техн. наук: 05.17.08 / В.Я. Бунько. – Бережани, 2013. – 158 с.
90. Сачок Р.В. Процес гранулоутворення мінерально-гумінових добрив: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.17.08 / Р.В. Сачок. – Київ, 2013. – 23 с.

91. Корнієнко Я.М. Моделювання безперервного процесу утворення багатошарових гуміново-мінеральних композитів / Я.М. Корнієнко, Р.В. Сачок // Хімічна інженерія, екологія та ресурсозбереження. – 2010. – №2 (6). – С. 39-44.
92. Корнієнко Я.М. Моделювання багатофакторних процесів під час одержання багатошарових гуміново-мінеральних композитів / Я.М. Корнієнко, Р.В. Сачок // Хімічна інженерія, екологія та ресурсозбереження. – 2011. – №1 (7). – С. 21-25.
93. Одинцов А.В. Капсулирование минеральных удобрений в тарельчатом грануляторе / А.В. Одинцов, А.Г. Липин, В.В. Степанов // Современные наукоемкие технологии. Региональное приложение. – 2009. – №4. – С. 64-68.
94. Одинцов А.В. Капсулирование гранул минеральных удобрений в гетерофазные оболочки / А.В. Одинцов, А.Г. Липин // Наукоемкие химические технологии – 2010: XIII Международная научно-техническая конференция, г. Иваново, 2010. – С. 269.
95. Овчинников Л.Н. Математическая модель по регулированию химического состава гранул НК-удобрений / Л.Н. Овчинников // Известия вузов. Химия и химическая технология. – 2008. – Т. 51, вып. 3. – С. 96-98.
96. Шахова Н.А. Кристаллизация плава мочевины в псевдооживленном слое с получением гранулированного продукта / Н.А. Шахова, А.И. Рачкова // Химическая промышленность. – 1963. – № 11. – С. 856-859.
97. Шахова Н.А. Математическая модель процесса образования пористых гранул в аппаратах с псевдооживленным слоем / Н.А. Шахова, В.В. Михайлов // Химическая промышленность. – 1975 – № 2. – С. 127-129.
98. Шахова Н.А. К расчету гранулометрического состава двухслойных удобрений, получаемых в псевдооживленном слое / Н.А. Шахова, И.Г. Гришаев // ТОХТ. – 1973. – Т.7. – № 5. – С. 781-784.

99. Шахова Н.А. Кинетика гранулообразования при безрeturном процессе в псевдооживленном слое / Н.А. Шахова, Н.М. Рагозина // Массообменные процессы химической технологии. – Л.: Химия. – 1967. – №3. – С. 77-79.
100. Шахова Н.А. Кинетика процесса гранулообразования в псевдооживленном слое / Н.А. Шахова // Химическая промышленность. – 1967. – № 6. – С. 459-462.
101. Werner A.W. Improved bubble velocity equation for bubbling fluidized beds / A.W. Werner, D.E. Chough // AIChE journal. – 1983 – №3, vol. 29. – P. 68-74.
102. ГОСТ 2081-2010. Карбамид. Технические условия. – Введ. 01.03.2011. – М.: Стандартинформ, 2011. – 24 с.
103. Нагурський О.А. Визначення товщини покриття капсульованих речовин із прогнозованими властивостями / О.А. Нагурський // Вісник НУ Львівська політехніка. Серія: Хімія, технологія речовин та їх застосування. – 2012. – № 726. – С. 225-228.
104. Nawozy wolnodzialajace. Oznaczanie uwalniania skladnikow odzywczych. Metoda dla nawozow otoczkowanych. Norma europejska EN 13266:2001. – Warszawa, 2003. – 12 s.
105. ГОСТ 21560.2-82. Удобрения минеральные. Метод определения статической прочности гранул. – Введ. 01.01.1983. – М.: Стандартинформ, 1983. – 4 с.
106. Рабинович С.Г. Погрешность измерений / С.Г. Рабинович. – Л.: Энергия, 1978. – 261 с.
107. Шенк Х. Теория инженерного эксперимента / Х. Шенк. – М.: Мир, 1972. – 381 с.
108. 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.
109. 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.

110. 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.
111. 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.
112. Плановский А.Н. Процессы и аппараты химической и нефтехимической технологии / А.Н. Плановский, П.И. Николаев. – М.: Химия, 1987. – 496 с.
113. Острога Р.О. Кінетика капсулювання гранульованих мінеральних добрив органічною оболонкою / Р.О. Острога // Вісник НТУ ХПІ. Серія: Нові рішення в сучасних технологіях. – 2014. – № 7 (1050). – С. 146-151.
114. 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. – С. 99-101.
115. Острога Р.А. Балансовые расчеты процесса капсулирования гранулированных минеральных удобрений / Р.А. Острога, Н.П. Юхименко // Сборник научных трудов SWorld. Серия: Технические науки. – 2013. – Т. 8, вып. 4. – С. 73-76.
116. Пат. 2049563 Российская Федерация, МПК В03С1/24, В01J8/16. Установка для активации процессов / Н.П. Вершинин, И.Н. Вершинин, И.В. Есаулов; заявители и патентообладатели Н.П. Вершинин, И.Н. Вершинин, И.В. Есаулов. – №5049103/26; заявл. 23.06.1992; опубл. 10.12.1995.
117. Patent DE 20 2006 020 896.8, IPC B01J19/12. Prozessaktivierungseinheit / Vershinin, Nikolay P., Rostovskaya, RU. – EP 06 82 4454.0; tag der Anmeldung 24.10.2006; tag der Eintragung 30.09.2010.
118. Пат. 59372 Российская Федерация, МПК А23N15/08. Аппарат для перемешивания, и/или размола, и/или снятия поверхностного слоя частиц органических и неорганических материалов / Н.П. Вершинин, И.Н.

- Вершинин; заявители и патентообладатели Н.П. Вершинин, И.Н. Вершинин. – №2006133468/22; заявл. 19.09.2006; опубл. 27.12.2006.
119. Пат. 2215221 Российская Федерация, МПК F16K5/10. Устройство для воздействия на поток текучей среды / Н.М. Качурин [и др.]; заявитель и патентообладатель ЗАО «ИНОКАР». – №2002129370/06; заявл. 05.11.2002; опубл. 27.10.2003.
120. Пат. 2215202 Российская Федерация, МПК F15D1/00, F17D1/20. Диспергатор примесей в текучей среде / Н.М. Качурин [и др.]; заявитель и патентообладатель ЗАО «ИНОКАР». – №2002129369/06; заявл. 05.11.2002; опубл. 27.10.2003.
121. Пат. 2049562 Российская Федерация, МПК B03C1/24, B01J8/16. Установка для активации процессов и разделения фаз / Н.П. Вершинин, И.Н. Вершинин; заявители и патентообладатели Н.П. Вершинин, И.Н. Вершинин. – №5049102/26; заявл. 23.06.1992; опубл. 10.12.1995.
122. Пат. 81492 Российская Федерация, МПК C02F1/48. Устройство для очистки жидкости (варианты) / А.П. Яковлев; заявитель и патентообладатель А.П. Яковлев. – №2007148397/22; заявл. 27.12.2007; опубл. 20.03.2009.
123. Пат. 91540 Российская Федерация, МПК B06B1/00. Вибростенд / А.П. Яковлев; заявитель и патентообладатель А.П. Яковлев. – №2009145181/22; заявл. 07.12.2009; опубл. 20.02.2010.
124. Вершинин И.Н. Аппараты с вращающимся электромагнитным полем / И.Н. Вершинин, Н.П. Вершинин. – М.: Передовые технологии XXI века, 2007. – 368 с.
125. Вершинин Н.П. Установки активации процессов / Н.П. Вершинин. – Ростов-на-Дону: Инноватор, 2004. – 96 с.
126. Логвиненко Д.Д. Интенсификация технологических процессов в аппаратах вихревого слоя / Д.Д. Логвиненко, О.П. Шеляков. – К.: Техника, 1976. – 113 с.

ДОДАТОК А



Рис. А.1 – Зовнішній вигляд кондуктометра SX716

Технічні параметри портативного кондуктометра SX716

Розчинений азот	
Область виміру	(0 to 40.00) mg/L(ppm) (0 to 200.0) %
Роздільна здатність	(0.1/0.01) mg/L(ppm) 1/0.1 %
Точність	Вимірювач: ± 0.10 mg/L, з приєднаним електродом ± 0.40 mg/L
Час відгуку	≤ 30 сек
Залишковий струм	≤ 0.1 mg/L
Температурна компенсація	(0 to 45) °C (автоматична)
Область компенсації солоності	(0 to 45) ppt (автоматична)
Компенсація по тиску	(80 to 105) kPa (автоматична)
Інші технічні параметри	
Збереження даних	100 груп
Зміст даних	Номер вимірюваної величини, вимірювана величина, температура, АТК, МТК, дата вимірювання та час
Електроживлення	Батарея AA 1.5 В $\times 2$
Розмір та вага	Вимірювач: 65 \times 120 \times 31 мм / 180 г Кейс: 255 \times 210 \times 50 мм / 790 г
Сертифікат якості	ISO 9001:2000, CE and CMC
Умови роботи	
Навколишня температура	(5 to 35) °C (0.01 градуси)
Навколишня вологість	≤ 85 %
ІР стандарт	IP 57 пило і водозахист

ДОДАТОК Б

Таблиця Б.1

Результати експериментальних досліджень гідродинаміки гранул карбаміду під час капсулювання суспензією курячого посліду в апараті псевдозрідженого шару з форсунковим розпилюванням

$l_{шт},$ $кг/(с \cdot м^2)$	$w, м/с$	2,8	3,5	4,8	5,6
0	$\Delta P,$ мм Н ₂ О (Па)	225,0 (2207,25)	282,0 (2766,42)	420,0 (4120,20)	493,0 (4836,33)
0,00657		287,0 (2815,47)	342,0 (3355,02)	479,0 (4698,99)	550,0 (5395,50)
0,00887		290,0 (2844,90)	344,5 (3379,55)	480,0 (4708,80)	551,0 (5405,31)
0,0131		294,0 (2884,14)	347,5 (3408,98)	482,0 (4728,42)	552,0 (5415,12)
0,0164		298,0 (2923,38)	350,0 (3433,50)	483,5 (4743,14)	553,0 (5424,93)

ДОДАТОК В

Таблиця В.1

Розподіл частинок за розмірами (D) в різні моменти часу (τ) протягом процесу капсулювання при витраті органічної суспензії 10 мл/хв (20 мл/хв)

Розмір частинок D, мм	Функція розподілу f, % мас.			
	$\tau = 0$ хв	$\tau = 20$ хв	$\tau = 40$ хв	$\tau = 60$ хв
1,5 – 2,0	3,4 (3,4)	2,7 (0,9)	0,7 (0,1)	0,1 (0)
2,0 – 2,5	75,2 (75,2)	41,7 (22,1)	32,2 (13,1)	27,8 (5,6)
2,5 – 3,0	8,7 (8,7)	37,7 (43,3)	41,4 (24,8)	40,3 (23,5)
3,0 – 3,5	11,9 (11,9)	16,4 (29,2)	21,9 (41,6)	27,0 (42,9)
3,5 – 4,0	0,8 (0,8)	1,5 (4,5)	3,8 (20,4)	4,8 (28,0)

ДОДАТОК Г

Таблиця Г.1

Розрахункові значення коефіцієнта тепловіддачі α , критеріїв Re , $Nu/Pr^{0,33}$ при відповідній швидкості повітря w

w , м/с	2,8	3,5	4,4	5,6
α , Вт/(м ² ·К)	63	77	93	120
Re	281,1	351,4	441,8	562,2
$Nu/Pr^{0,33}$	4,80	5,85	7,10	9,10

ДОДАТОК Д

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Директор Державного підприємства
 “Сумський державний науково-
 дослідний інститут мінеральних
 добрив і пігментів”

К.т.н. С.В. Вакал
 “_____” 2014 р.



АКТ

використання результатів дисертаційної роботи

«Процес покриття гранул мінеральних добрив органічною суспензією»

Аспіранта Остроги Руслана Олексійовича

Ми, що нижче підписалися: від Сумського державного університету: аспірант Острога Р.О., завідуючий кафедрою процесів та обладнання хімічних і нафтопереробних виробництв д.т.н., проф. Склабінський В.І.; від Державного підприємства “Сумський державний науково-дослідний інститут мінеральних добрив і пігментів”: начальник відділу мінеральних добрив і фосфорної кислоти к.т.н. Карпович Е.О. та начальник відділу фізико-хімічних та аналітичних методів контролю Карпенко Т.В., підтверджуємо, що результати дисертаційної роботи Остроги Р.О. передані для використання у розробці вихідних даних на проектування та техніко-комерційних пропозицій на Державному підприємстві “Сумський державний науково-дослідний інститут мінеральних добрив і пігментів”, а саме:

1. Результати дослідження та узагальнення кінетики росту гранул у «киплячому» шарі.
2. Режимно-технологічні параметри нанесення суспензії курячого посліду на гранули мінеральних добрив.
3. Принципова схема установки покриття гранул мінеральних добрив суспензією органіки.

4. На основі аналізу експериментальних результатів встановлено:
- отримані Острогою Р.О. теоретичні залежності дають змогу розраховувати енергетичні витрати на створення двошарових гранул;
 - отримані залежності у вигляді критеріальних рівнянь дозволяють визначити оптимальні умови ведення процесу капсулювання гранул.
5. Результати дисертаційної роботи Остроги Р.О. приймаються Державним підприємством “Сумський державний науково-дослідний інститут мінеральних добрив і пігментів” для використання їх у розробці вихідних даних на проектування та техніко-комерційних пропозицій.

Від Державного підприємства “Сумський державний науково-дослідний інститут мінеральних добрив і пігментів”

Начальник відділу мінеральних
добрив і фосфорної кислоти, к.т.н.

Е.О. Карпович

Начальник відділу фізико-хімічних та
аналітичних методів контролю

Т.В. Карпенко

Від Сумського державного університету

Аспірант

Р.О. Острога

Зав. кафедрою процесів та обладнання
хімічних і нафтопереробних виробництв,
д.т.н., проф.

В.І. Склабінський

ДОДАТОК Е



(11) **73107**(19) **UA**(51) МПК (2012.01)
C05G 5/00

(21) Номер заявки:	u 2012 02645	(72) Винахідники:
(22) Дата подання заявки:	05.03.2012	Якушко Сергій Іванович, UA,
(24) Дата, з якої є чинними права на корисну модель:	10.09.2012	Острога Руслан
(46) Дата публікації відомостей про видачу патенту та номер бюлетеня:	10.09.2012, Бюл. № 17	Олексійович, UA,
		Співак Євген Сергійович, UA
		(73) Власник:
		СУМСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ (СУМДУ),
		вул. Римського-Корсакова, 2,
		м. Суми, 40007, UA

(54) Назва корисної моделі:

ГРАНУЛЬОВАНЕ ОРГАНО-МІНЕРАЛЬНЕ ДОБРИВО

(57) Формула корисної моделі:

1. Гранульоване органо-мінеральне добриво, яке містить ядро, що включає азотні або фосфорні, або калієві живильні речовини, або їх комбінації, і покрите оболонкою, яке відрізняється тим, що як основу оболонки використовують органічну речовину, що містить пташиний послід або гній тварин, або сапропель, або їх комбінації.

2. Гранульоване органо-мінеральне добриво за п. 1, яке відрізняється тим, що оболонка складає 40-60 мас. % від загальної маси гранули.