

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
СУМСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

ОСТРОГА РУСЛАН ОЛЕКСІЙОВИЧ



УДК 66.099.2:66.045:[631.841.7+661.152.4+661.152.33]:303.732.4(043.5)

**ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ПРОЦЕСІВ ФОРМУВАННЯ
ГРАНУЛ У НЕОДНОРІДНОМУ СЕРЕДОВИЩІ**

Спеціальність 05.17.08 – процеси та обладнання хімічної технології

Реферат
дисертації на здобуття наукового ступеня
доктора технічних наук

Суми – 2024

Дисертація є кваліфікаційною науковою працею на правах рукопису.

Робота виконана на кафедрі хімічної інженерії Сумського державного університету Міністерства освіти і науки України.

Науковий консультант – доктор технічних наук, професор
Склабінський Всеволод Іванович,
Сумський державний університет
Міністерства освіти і науки України,
професор кафедри хімічної інженерії.

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор
Цейтлін Мусій Абрамович,
Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут» Міністерства освіти і науки України, професор кафедри хімічної техніки та промислової екології;

доктор технічних наук, професор
Гумницький Ярослав Михайлович,
Національний університет «Львівська політехніка»
Міністерства освіти і науки України, професор кафедри екології та збалансованого природокористування;

доктор технічних наук, професор
Нікольський Валерій Євгенович,
Державний вищий навчальний заклад «Український державний хіміко-технологічний університет» Міністерства освіти і науки України, професор кафедри енергетики.

Захист дисертації відбудеться 11 жовтня 2024 року об 11-й год 00 хв на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 55.051.04 в Сумському державному університеті за адресою: 40007, м. Суми, вул. Харківська, 116, корп. Ц, ауд. 204.

Із дисертацією можна ознайомитися в бібліотеці Сумського державного університету за адресою: 40007, м. Суми, вул. Харківська, 116, та на сайті спеціалізованої вченої ради Д 55.051.04 за електронною адресою: <https://sumdu.edu.ua/uk/science/science-info/scientific-infrastructure/specialized-council/permanent-specialized-council/102-55-051-04.html>.

Реферат розісланий 6 вересня 2024 року.

Учений секретар
спеціалізованої вченої ради Д 55.051.04



О. О. Ляпощенко

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Виробництво гранульованих продуктів було і залишається актуальним у сучасному світі. Процеси гранулювання широко використовуються при виробництві добрив, фармацевтичних препаратів, харчових добавок та інших технічних матеріалів. На даний час отримання гранул базується на трьох основних способах – це: приллювання, обкочування та нарощування у псевдозріджених чи зважених шарах. І якщо отримання однорідних гранул у грануляційних баштах та барабанних грануляторах достатньо добре засвоєно промисловістю, то отримання гранульованих продуктів на тарілчастих грануляторах та в апаратах з активною гідродинамікою потоків не знаходить належного використання у виробництвах. Останнє обумовлюється недостатнім вивченням науково-теоретичних основ формування гранул у неоднорідних середовищах. Особливо це стосується вивчення закономірностей формування гранул у киплячих та зважених шарах, при отриманні, насамперед, пористих та багатошарових гранул. Тому подальший розвиток основних технологічних стадій виробництва гранульованих продуктів треба спрямувати на вдосконалення апаратурного оформлення грануляторів, встановлення найбільш раціональних режимно-технологічних параметрів ведення процесу з метою підвищення його ефективності та зменшення енергетичних витрат.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертаційна робота виконувалась за підтримки проекту Eurizon, який фінансується Європейським Союзом (ініціатива Horizon Europe, грантова угода № 871072) «Monodisperse systems in the production of foodstuff and compound (combined) fertilizers». А також згідно з пріоритетними напрямками наукової роботи Сумського державного університету «Гідродинамічні показники двофазних потоків тепломасообмінного, грануляційного та сепараційного обладнання» (номер державної реєстрації 0115U002551, термін виконання 2015–2019 рр.), «Small-scale energy-saving modules with the use of multifunctional devices with intensive hydrodynamics for the production, modification and encapsulation of granules» (номер державної реєстрації 0119U100834, термін виконання 2019–2021 рр.), «Створення нових гранульованих матеріалів для ядерного палива та каталізаторів в активному гідродинамічному середовищі» (номер державної реєстрації 0120U102036, термін виконання 2020–2022 рр.), «Виконання завдань перспективного плану розвитку наукового напрямку «Технічні науки» Сумського державного університету» – етап 3 (номер державної реєстрації 0121U112684, термін виконання 2023 р.).

Наукові розробки впроваджені під час виконання госпдоговірних науково-дослідних робіт за темами «Наукове обґрунтування вибору оптимального апаратурного оформлення малогабаритної мобільної установки капсулювання мінеральних добрив» (замовник – ТОВ «Альянс»), «Напрацювання дослідних зразків гранульованих добрив на органічній основі» (замовник – ТОВ «Білопілля Агросвіт»), «Напрацювання дослідних зразків складнозмішаних (комбінованих) добрив спеціального призначення» (замовник – ТОВ «Аграрник»).

Мета дослідження. Метою роботи є розроблення та обґрунтування науково-теоретичних основ процесів формування гранул у неоднорідному середовищі шляхом застосування методів обкочування та прильовання, а також у псевдозріджених та завислих шарах з активною гідродинамікою потоків.

Завдання досліджень. Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі завдання:

- провести системний аналіз сучасних напрямів гранулювання з подальшим отриманням однорідних, пористих та багат шарових гранул;
- створити теоретичні основи розрахунку розпаду струменів рідини (плаву) на краплі під впливом власних коливань;
- теоретично дослідити зміну температури гранули мінеральних добрив по її радіусу при контакті з повітрям у грануляційній башті;
- визначити вплив температури шару на процес отримання укрупнених гранул мінеральних добрив у тарілчастому грануляторі;
- розробити науково-теоретичні основи впливу дисперсійного газового середовища на механізми зважування твердих частинок та їх сепарацію в активних гідродинамічних умовах;
- розробити науково-теоретичні основи впливу температури на формування пористої структури оболонки гранули;
- проаналізувати особливості міжфазного теплообміну у системі «газ – тверда фаза» в умовах зважених шарів;
- провести теоретичні та експериментальні дослідження процесів формування гранул в багатоступеневих апаратах зваженого шару;
- провести теоретичні та експериментальні дослідження високоефективного обладнання для конвективного охолодження гранульованих та зернистих матеріалів;
- розробити техніко-економічні аспекти вибору та експлуатації конвективних охолоджувачів.

Об'єкт дослідження – процеси одержання суцільних та капсульованих гранул із заданими властивостями.

Предмет дослідження – процеси формування гранул обкочуванням, прильованням та в умовах активної гідродинаміки потоків.

Методи дослідження. Теоретичні аспекти дисертаційної роботи ґрунтуються на фізичному та математичному моделюванні процесів гранулоутворення. На емпіричному рівні наукових досліджень застосовувався метод прямого спостереження. Під час проведення експериментальних досліджень застосовували методи багат факторного планування експерименту. Визначення гранулометричного складу частинок проводили методом ситового аналізу. Для дослідження структури гранул застосовували мікроскопічний метод, а також метод оптичного мікрофотографування з подальшим програмним обробленням результатів.

Математичне моделювання гідродинамічних параметрів неоднорідних систем виконувалось на основі класичних положень гідромеханіки та технічної гідромеханіки із використанням програмного забезпечення FlowVision, Ansys

CFX та Ansys Fluent. Для отримання більш точної апроксимації криволінійної геометрії у програмі FlowVision використовувалась технологія підсіточного розширення геометрії, яка дозволяє імпортувати геометричні дані з систем комп'ютерного проектування та обмінюватися інформацією з системами кінцево-елементного аналізу. Для вирішення рівнянь математичної моделі використовували системи комп'ютерної алгебри, а саме: Maple та wxMaxima.

Аналіз одержаних закономірностей здійснювали із застосуванням диференціальних методів математичного аналізу та інтегрального обчислення, які виконували за допомогою комп'ютерної техніки та пакету прикладних програм, а саме: MathCAD, MS Office Excel. Визначення похибки вимірювань і результати розрахунків базуються на загальноприйнятих методиках та рекомендаціях щодо обробки інженерних та експериментальних даних.

Наукова новизна одержаних результатів. На базі виконаних теоретичних і експериментальних досліджень отримані такі наукові результати:

вперше:

- створено науково-теоретичні основи для визначення температурного профілю у двошаровій гранулі, що дозволяє враховувати складні взаємодії між шарами гранули, теплопередачу, а також фізико-хімічні властивості використовуваних речовин;

- теоретично проаналізовано вплив пористої структури оболонки на характер теплопровідності, включаючи комплексний аналіз взаємозв'язку між морфологією пор та ефективністю теплопередачі у шарі матеріалу;

- представлено характеристику умов розмежування стадій теплоперенесення в системі «газ – тверда фаза» для псевдозріджених та завислих шарів;

- створено науково-теоретичні основи формування гранул в багатоступеневих апаратах зваженого шару, що відкриває нові можливості для оптимізації процесів гранулоутворення у складних гетерогенних системах та сприяє підвищенню ефективності та якості виробництва гранульованих продуктів у різних галузях промисловості;

- проведено ексергетичний аналіз для раціонального вибору конструкції охолоджувача гранул мінеральних добрив, що дозволяє систематично оцінити ефективність різних конструкцій охолоджувачів з точки зору енергетичних втрат та ефективності використання енергії;

набули подальшого розвитку:

- науково-теоретичні основи процесу гранулювання, який ускладнений умовами сепарації дрібних частинок, що дає можливість прогнозувати гранулометричний склад кінцевого продукту;

- науково-теоретичні основи щодо особливостей зважених шарів із активною гідродинамікою потоків;

удосконалено:

- методологічну основу теоретичного розрахунку розпаду струменів та теоретичного визначення розміру крапель рідини під впливом власних коливань у струмені рідини (плаву);

– методологічну основу теоретичного аналізу температурного профілю гранул мінеральних добрив уздовж радіуса цієї гранули до її центру, що дозволяє визначати динаміку зміни температури гранули при її конвективному охолодженні у грануляційній башті;

– алгоритм розрахунків температурного профілю за допомогою диференційного рівняння Фур'є при граничних умовах 3-го роду шляхом отримання регресійних рівнянь для визначення сталих коефіцієнтів.

Практичне значення одержаних результатів.

1. Розроблено математичну модель з чисельним алгоритмом та програмним забезпеченням для визначення величини виносу дрібних фракцій із псевдозріджених та завислих шарів, що дає змогу визначати гранулометричний склад ретуру та прогнозувати гранулометричний склад готового продукту. Рівняння для визначення величини виносу дрібної фракції мають емпіричний характер та враховують вплив швидкості газового потоку та швидкості витання твердих частинок. Таким чином, алгоритм розрахунку дозволяє підібрати оптимальний гідродинамічний режим псевдозрідження з метою отримання гранул заданого гранулометричного складу.

2. Розроблено методику термодинамічного та ексергетичного аналізів раціонального вибору певних типів охолоджувачів гранульованих мінеральних добрив. Запропонований метод враховує як термодинамічні показники – коефіцієнт охолодження, коефіцієнт рекуперації, термодинамічний коефіцієнт корисної дії, так і ексергетичні – ексергетичний коефіцієнт корисної дії. Такий підхід дозволяє більш коректно оцінити енергетичні витрати на процес охолодження дисперсних матеріалів та підібрати енергозберігаючу конструкцію апарата.

3. Визначено конструктивно-технологічні параметри робочої камери поличного гранулятора зі зваженим шаром, що дозволяє реалізувати активний струменевий гідродинамічний режим зважування. Такий підхід сприяє покращенню ефективності технологічних процесів у промислових умовах і може мати значний вплив на підвищення конкурентоспроможності підприємств, які займаються виробництвом гранульованих продуктів.

4. Розроблено практичні рекомендації щодо впровадження у виробництво малогабаритної мобільної установки для капсулювання мінеральних добрив на базі Товариства з обмеженою відповідальністю «Альянс» (акт впровадження від 15.11.2017 р.), а також виконані напрацювання дослідних зразків гранульованих добрив на органічній основі для Товариства з обмеженою відповідальністю «Білопілля Агросвіт» (акт впровадження від 01.12.2022 р.) та напрацювання дослідних зразків складнозмішаних (комбінованих) добрив спеціального призначення для Товариства з обмеженою відповідальністю «Аграрник» (акт впровадження від 30.06.2023 р.).

5. Упроваджено в навчальний процес кафедри хімічної інженерії Сумського державного університету наукові результати відповідно до теми НДР «Створення нових гранульованих матеріалів для ядерного палива та каталізаторів в активному гідродинамічному середовищі», ДР № 0120U102036 (акт впровадження від 26.12.2022 р.); відповідно до теми НДР «Виконання

завдань перспективного плану розвитку наукового напрямку «Технічні науки» Сумського державного університету», ДР № 0121U112684 (акт впровадження від 28.12.2023 р.).

Особистий внесок здобувача полягає в аналізованні стану проблеми, формуванні та розробленні основної ідеї й теми дисертації, створенні наукових положень системного підходу до розроблення комплексних рішень щодо процесів формування гранул у неоднорідному середовищі, зокрема розробленні науково-методичних підходів до тепло- і масообмінних з перспективою подальшого отримання однорідних, пористих та багат шарових гранул [1; 5; 6; 15; 17; 18; 33; 36; 41; 42], дослідженні умов формування гранул у неоднорідному середовищі «газ – тверда фаза» [1; 7; 9; 10; 14; 17; 37; 38; 41], проведенні теоретичних та експериментальних досліджень процесів формування гранул в багатоступеневих апаратах зваженого шару [1; 2; 8; 13; 16; 35], дослідженні умов впливу на міжфазний теплообмін у неоднорідному середовищі «газ – тверда фаза» [1; 3; 12; 13; 34], розробленні техніко-економічних аспектів вибору високоефективного обладнання для отримання гранульованих матеріалів [1; 4; 11; 33; 39; 40]. Усі результати, що складають основний зміст дисертаційної роботи, обговорювалися на конференціях та наукових фестивалях різного рівня, зокрема [19–32].

Вищезазначена нумерація робіт, виконаних у співавторстві, відповідає списку наукових праць дисертанта, наведеному в рефераті.

Апробація результатів дисертації. Основні наукові й практичні результати роботи доповідалися та обговорювалися на таких науково-технічних, науково-практичних конференціях і семінарах всеукраїнського й міжнародного рівнів: науково-технічних конференціях викладачів, співробітників, аспірантів і студентів факультету технічних систем та енергоефективних технологій «Сучасні технології у промисловому виробництві» (м. Суми, 14–17 квітня 2015 р.; 18–21 квітня 2017 р.); I науково-методичній конференції «Освіта, наука та виробництво: розвиток та перспективи» (м. Шостка, 28 квітня 2015 р.); IV, VIII Всеукраїнських науково-технічних конференціях «Сучасні технології у промисловому виробництві» (м. Суми, 19–22 квітня 2016 р.; 20–23 квітня 2021 р.); I Всеукраїнській науково-методичній конференції «Освіта, наука та виробництво: розвиток і перспективи» (м. Шостка, 21 квітня 2016 р.); III Міжнародній науково-практичній конференції «Хімічна технологія: наука, економіка та виробництво» (м. Шостка, 23–25 листопада 2016 р.); VI Міжнародному молодіжному науковому форумі «Litteris et Artibus» (м. Львів, 24–26 листопада 2016 р.); Міжнародній науковій конференції «Chemical Technology and Engineering» (м. Львів, 26–30 червня 2017 р.); науковому семінарі «Praktyczne Aspekty Inżynierii Chemicznej» (м. Познань, 23 червня 2017 р.); I, III, VI, VII Міжнародних конференціях «Design, Simulation, Manufacturing: The Innovation Exchange» (м. Суми, 12–15 червня 2018 р.; м. Харків, 09–12 червня 2020 р.; м. Високі Татри, 06–09 червня 2023 р.; м. Пльзень, 04–07 червня 2024 р.).

Публікації. За результатами дисертаційної роботи опубліковано 42 наукові праці, із яких: 2 монографії у співавторстві, 3 розділи колективних

монографій, 23 статті, зокрема, 5 статей у наукових фахових виданнях із переліку МОН України, 16 статей у зарубіжних наукових періодичних виданнях та у виданнях, що індексуються міжнародними наукометричними базами даних (Scopus та Web of Science), 14 матеріалів доповідей у збірниках праць конференцій.

Структура та обсяг дисертації. Дисертація складається з анотації, вступу, шести розділів, висновків, списку використаних джерел, що вміщує 383 найменувань на 54 сторінках, та 5 додатків на 22 сторінках. Загальний обсяг дисертації становить 339 сторінок, із яких основний текст – 234 сторінки, робота містить 67 рисунків та 17 таблиць.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі подано загальну характеристику дисертаційної роботи. Обґрунтовано необхідність проведення наукових досліджень та їх актуальність із огляду на сучасний стан проблеми підвищення ефективності процесу формування гранул у неоднорідному середовищі «газ – тверда частинка» та зниження енергетичних витрат на процес. Показано зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Сформульовано мету й завдання досліджень, які були виконані для їх досягнення. На підставі цього визначено об'єкт і предмет досліджень. Наведено методи досліджень, використані в дисертації, сформульовано нові наукові результати, визначено практичне значення одержаних результатів і відомості про впровадження результатів досліджень, особистий внесок автора, апробацію поданих пропозицій, повноту викладу матеріалів у публікаціях та обсяг дисертаційної роботи.

У першому розділі проаналізовано літературні джерела та визначено основні способи гранулювання, які є найбільш поширеними у сучасних виробництвах – це диспергування плавів та послідує охолодження утворених гранул у грануляційних баштах (приллювання); обкочування з одночасним диспергуванням плаву на поверхню гранул; диспергування пульпи чи суспензії у псевдозріджений (зважений) шар.

Визначено, що метод приллювання стає більш рентабельним за досить високих продуктивностей, а саме вище 200 т/добу. Іншою перевагою метода приллювання є така характеристика як середня щільність зрошення поперечного перерізу башти, що дозволяє збільшити продуктивність одиниці об'єму грануляційної башти у 4–5 разів. Тому, зважаючи на вищезазначені переваги, метод приллювання знайшов досить поширене використання при виробництві гранульованих азотних добрив (карбаміду та аміачної селітри).

Характер витікання і дроблення струменів значною мірою залежить від швидкості витікання рідини із отворів корзини u_0 . Поки швидкість u_0 порівняно невелика, витікання має ламінарний характер, і струмінь до свого розпаду зберігає вісесиметричну форму (рисунок 1, а). Однак, із подальшим збільшенням швидкості u_0 , аеродинамічна дія зовнішнього середовища на струмінь зростає, і його вісесиметрична форма перетворюється на хвильову (рисунок 1, б), яка характеризується дробленням на краплі різних розмірів.

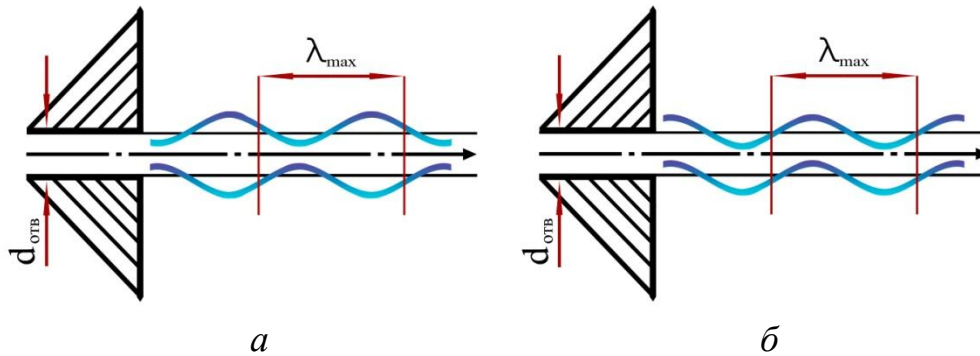


Рисунок 1 – Профіль струменів перед їх розпадом:

a – вісесиметричний струмінь із капілярними хвилями; *б* – хвильовий струмінь

Зазначено, що залежно від питомої потужності випромінювача регулярних коливань можна отримати рівномірні краплі як із «супутниками» (рисунок 2, *a*), так і без них (рисунок 2, *б*).



Рисунок 2 – Утворення рівномірних крапель без «супутників» під час накладання на струмінь регулярних імпульсів тиску від коливної мембрани:

a – перша стадія – утворення грушоподібних крапель;

б – друга стадія – утворення сферичних крапель без «супутників»

Аналіз способу гранулювання в баштах методом приливання виявив недостатній рівень знань щодо механізму утворення крапель при накладенні вібраційних коливань на струмені, які витікають із отворів вібраційних грануляторів. Також виявлено нестачу інформації про швидкості руху крапель при їх падінні в грануляційній башті. Відсутні практичні залежності для визначення температурних профілів гранул та охолоджуючого повітря.

Зазначено, що для отримання гранул пролонгованої дії, тобто нанесення оболонки на зародкові гранули карбаміду, ефективним є спосіб гранулювання обкочуванням на тарілчастому грануляторі з одночасним диспергуванням плаву на поверхню гранул. На міцнісні властивості отриманих гранул впливають такі робочі параметри процесу, як швидкість розпилення в'язучої речовини, її концентрація, кількісна подача порошкоподібного ретурну, кут нахилу та частота обертання тарілки.

Гранулювання диспергуванням суспензій у псевдозріджений шар в апаратах киплячого та завислого шарів добре зарекомендувало себе як найбільш раціональний спосіб (мінімізація витрат на обробку вологих органічних речовин) для виробництва органо-мінеральних добрив пролонгованої дії. Проведення процесу гранулювання в апаратах із використанням активного гідродинамічного режиму, при якому забезпечується збільшення відносної швидкості руху взаємодіючих фаз, сприяє інтенсифікації процесу без зниження економічної ефективності роботи апарата.

Якщо проаналізувати відомі гідродинамічні режими за показником їх активності в межах раціонального використання, то найгірші показники буде мати киплячий шар, а найкращі – фонтануючий та вихровий шари, закручені потоки. Тому раціональним варіантом має бути такий апарат, який би поєднав вище розглянуті гідродинамічні режими при їх реалізації в єдиному робочому просторі.

Перспективним напрямом зменшення матеріальних та енергетичних витрат при проведенні тепломасообмінних процесів у зваженому шарі є використання багатоступеневого протиточного контакту зріджувального агента та дисперсної фази. Тому процес гранулювання (чи капсулювання) доцільно проводити в багатоступеному апараті зваженого шару з похилими перфорованими полицями.

Для завершення модифікаційних перетворень всередині гранули, тобто для стабілізації її структури, важливою технологічною стадією є конвективне охолодження гранул. Тому у першому розділі розглянуто основні конструкції конвективних охолоджувачів, аналіз яких дозволяє визначити найбільш раціональний апарат – поличний охолоджувач-пневмокласифікатор.

Зважаючи на проведений аналіз наукових та практичних досягнень і водночас виявлені недоліки, сформульовані вищенаведені мета й завдання досліджень.

У другому розділі представлено загальну методику проведення досліджень, наведено опис експериментальних установок (рисунки 3, 4) для проведення досліджень у рамках визначених дисертаційною роботою завдань, розроблено та обґрунтовано методики експериментальних досліджень, представлено методику обробки результатів досліджень та оцінку похибок вимірювання.

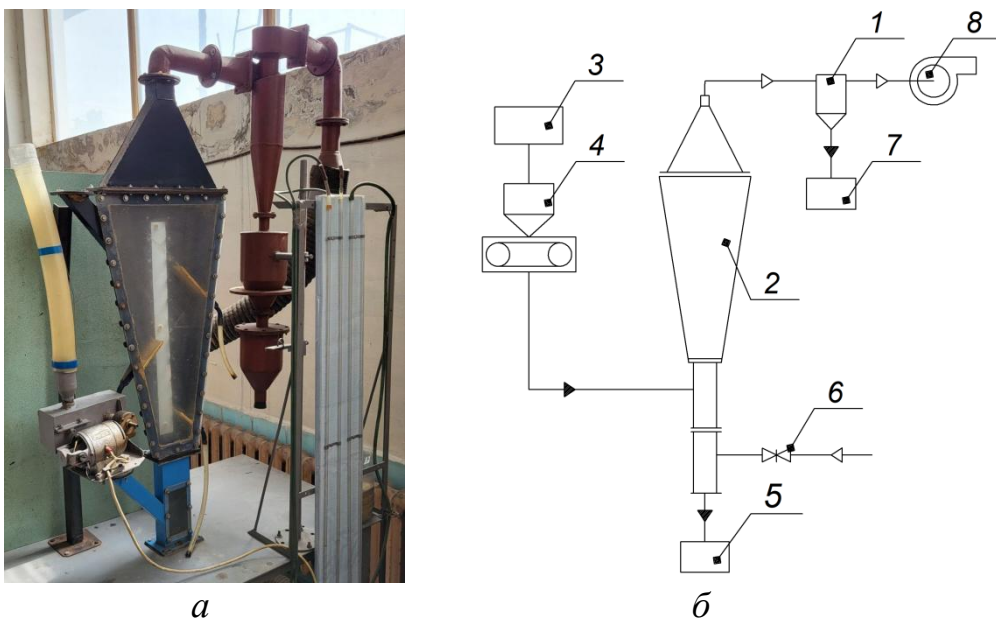
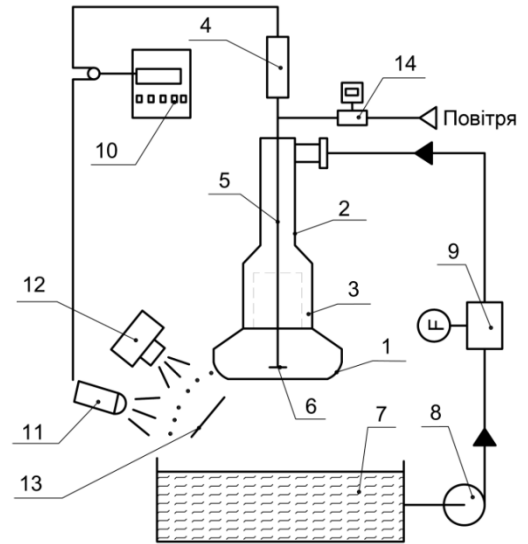


Рисунок 3 – Зовнішній вигляд (а) та схема (б) поличного багатоступеневого апарата зваженого шару: 1 – циклон; 2 – поличний гранулятор; 3 – бункер вихідних гранул; 4 – дозатор; 5 – бункер крупних гранул; 6 – вентиль регулюючий; 7 – бункер дрібних гранул



а



б

Рисунок 4 – Зовнішній вигляд (а) та схема (б) обертового вібраційного гранулятора: 1 – перфороване днище (корзина); 2 – корпус; 3 – фільтр; 4 – актуатор (збудник коливань); 5 – шток; 6 – диск; 7 – буферна ємність; 8 – насос; 9 – витратомір; 10 – система керування; 11 – стробоскоп; 12 – пристрій фотофіксації; 13 – екран зі шкалою; 14 – індикатор рівня

Також визначено методи і засоби математичного моделювання. Зазначено, що математичне моделювання гідродинамічних параметрів неоднорідних систем виконувалось на основі класичних положень гідромеханіки та технічної гідромеханіки, із використанням програмного забезпечення FlowVision, Ansys CFX та Ansys Fluent. Для вирішення рівнянь математичної моделі використовували системи комп'ютерної алгебри, а саме: Maple та wxMaxima. Аналіз одержаних закономірностей здійснювали із застосуванням диференціальних методів математичного аналізу та інтегрального обчислення, які виконували за допомогою комп'ютерної техніки та пакету прикладних програм, а саме: MathCAD, MS Office Excel.

Третій розділ присвячений теоретичному опису умов формування гранул у неоднорідному середовищі «газ – тверда фаза». Проаналізовано вплив конструктивних параметрів корзини обертового вібраційного гранулятора на утворення крапель плаву.

Для розробки теоретичного методу розрахунку та рекомендацій щодо вибору форми кошика та швидкості його обертання було використано рівняння руху гранул у повітряному потоці:

$$\begin{cases} \frac{d^2}{d\tau^2} x(\tau) = - \frac{3 \cdot \xi_x \cdot \rho_{нов} \cdot \left(\frac{d}{d\tau} x(\tau) + W_x \right)^2}{4 \cdot d_z \cdot \rho_z}; \\ \frac{d^2}{d\tau^2} y(\tau) = g - \frac{3 \cdot \xi_y \cdot \rho_{нов} \cdot \left(\frac{d}{d\tau} y(\tau) + W_y \right)^2}{4 \cdot d_z \cdot \rho_z}. \end{cases} \quad (1)$$

На рисунку 5 показані результати розрахунків радіуса факела розпилу плаву, якому відповідає горизонтальна складова траєкторії краплі, що виходить з найбільшого радіусу кошика для аміачної селітри у грануляційній башті висотою 80 м.

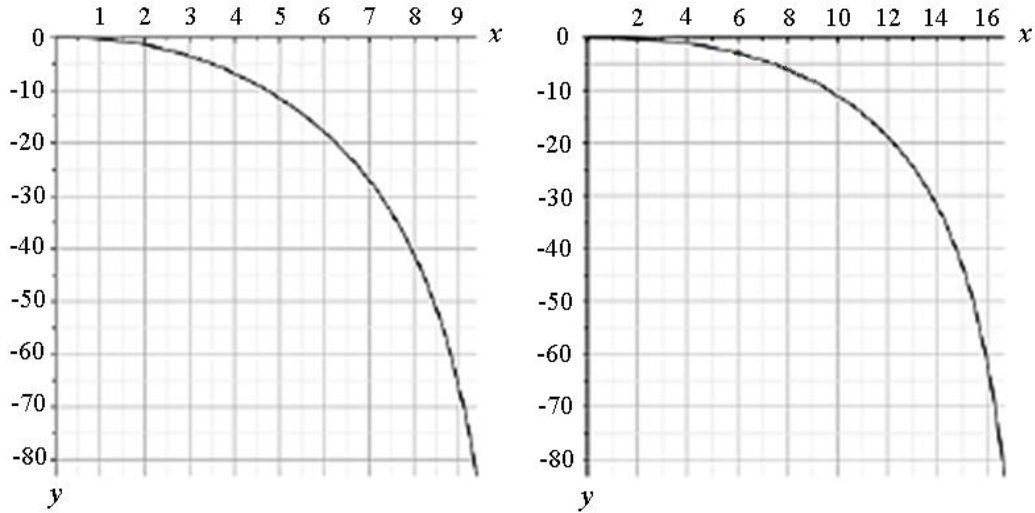


Рисунок 5 – Зміна радіуса факела розпилу для швидкості обертання ОВГ:
 a – 180 об./хв.; b – 250 об./хв.

Збільшення швидкості обертання на 70 об./хв. призводить до значного (майже вдвічі) збільшення радіуса факела розпилу, а це, у свою чергу, дає можливість впливати на розміри факела розпилу за допомогою зміни швидкості обертання гранулятора.

Теоретичний опис руху рідини в струмені заснований на рівняннях так званої «теорії струменя». Відомо, наприклад, приблизний розв'язок цих рівнянь на фіксований момент часу. При цьому використовувалися рівняння руху рідини у стаціонарному режимі в циліндричній системі координат:

$$\frac{\partial}{\partial z} V_z(r, z) + \frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{r \cdot V_r(r, z)}{r} \right) = 0;$$

$$V_r(r, z) \left(\frac{\partial}{\partial r} V_r(r, z) \right) = - \frac{\partial P(r, z)}{\partial r} \rho + \varepsilon \left(\frac{\partial^2}{\partial z^2} V_r(r, z) + \frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{r \cdot V_r(r, z)}{r} \right) \right) \right); \quad (2)$$

$$V_r(r, z) \left(\frac{\partial}{\partial r} V_r(r, z) \right) = - \frac{\partial P(r, z)}{\partial r} \rho + \varepsilon \left(\frac{\partial^2}{\partial z^2} V_r(r, z) + \frac{\partial}{\partial z} \left(r \left(\frac{\partial}{\partial r} V_z(r, z) \right) \right) \right).$$

Пошук рішення здійснювався у вигляді многочленів:

$$V_z(r, z) = A_1 \cdot r^2 \cdot z^2 + A_2 \cdot r + A_3, \quad (3)$$

із урахуванням припущення, що максимальний осьовий компонент швидкості рідини у струмені буде саме на осі струменя.

Основний інтерес представляє аналіз поведінки радіального компоненту швидкості рідини. Припускаємо, що саме збільшення значення цієї швидкості до критичного значення є причиною подолання сил поверхневого натягу, що призводить до руйнування струменя і утворення крапель.

Для радіальної складової швидкості рідини розглянемо її поведінку по радіусу струменя. Для наочності розрахуємо параметри витікання струменя з отвору, які перераховані вище. Виберемо три радіуси всередині струменя $r_1 = 0,55$ мм, $r_2 = 0,35$ мм, $r_3 = 0,15$ мм:

$$V_{r1} = 3.273194163 \cdot 10^{43} \times \left(-2.32755800 \cdot 10^{-33} \cdot z^2 - 7.7792400 \cdot 10^{-38} \cdot z + 1.8439630 \cdot 10^{-31} \cdot z^3 + \right. \\ \left. + 1.436764 \cdot 10^{-27} \cdot z^4 + 9.6724 \cdot 10^{-25} \cdot z^5 + 3.520432 \cdot 10^{-40} \right); \quad (4)$$

$$V_{r2} = 9.453956745 \cdot 10^{43} \times \left(-5.1218200 \cdot 10^{-34} \cdot z^2 - 1.71396000 \cdot 10^{-38} \cdot z + 6.644600 \cdot 10^{-33} \cdot z^3 + \right. \\ \left. + 3.161618 \cdot 10^{-28} \cdot z^4 + 2.1253 \cdot 10^{-25} \cdot z^5 + 3.13711 \cdot 10^{-41} \right); \quad (5)$$

$$V_{r3} = 5.400219324 \cdot 10^{42} \times \left(-3.84017600 \cdot 10^{-33} \cdot z^2 - 1.285956000 \cdot 10^{-37} \cdot z + 1.6796500 \cdot 10^{-33} \cdot z^3 + \right. \\ \left. + 2.3704792 \cdot 10^{-27} \cdot z^4 + 1.59252 \cdot 10^{-24} \cdot z^5 + 4.320198 \cdot 10^{-41} \right). \quad (6)$$

Для більшої ясності і аналізу краще представити результат у вигляді графічної залежності (рисунок 6).

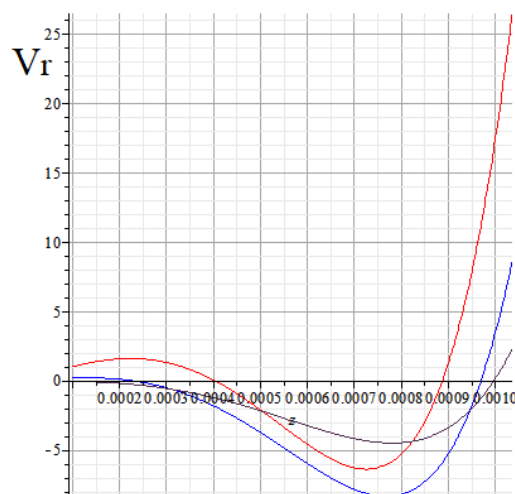


Рисунок 6 – Графіки зміни радіальної швидкості рідини у струмені на радіусі r по осі струменя:

червона лінія – $r_1=0,55$ мм; синя лінія – $r_2=0,35$ мм; фіолетова лінія – $r_3=0,15$ мм

Із отриманих графічних залежностей видно, що у струмені, навіть при постійній величині тиску в рідині, виникають власні поперечні коливання (зміна величини радіальної складової швидкості). Величина радіальної швидкості в перерізі збільшується від центру струменя до периферії. Такі зміни радіальної швидкості призводять до руйнування струменя і утворення крапель.

Проаналізовано вплив режимно-технологічних параметрів на механізм гранулоутворення в тарілчастому грануляторі. Експериментально встановлено, що зниження температури шару нижче 100°C погіршує якість продукції, викликає агломерацію дрібних частинок, а також отримані гранули мають суттєві відхилення від сферичної форми (рисунок 7).

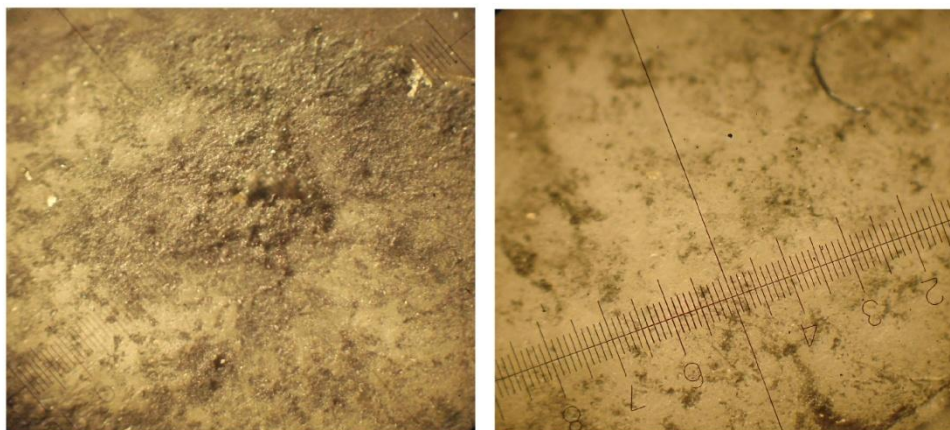


Рисунок 7 – Зрізи гранул карбаміду, що одержані при відповідному температурному режимі шару: *a* – $95\text{--}100^{\circ}\text{C}$; *б* – $115\text{--}120^{\circ}\text{C}$

Загалом, процес гранулювання карбаміду в лабораторних умовах має раціональні режимно-технологічні параметри. Робочі границі зміни кута нахилу тарілки становлять $30\text{--}60^{\circ}$ при висоті борта 100 мм. Оптимальний кут нахилу тарілки при отриманні гранул карбаміду становить 45° , а температура його плаву при розпиленні $134\text{--}140^{\circ}\text{C}$. Для гідравлічної форсунки оптимальний факел розпилення $\beta=65^{\circ}$ при тиску в ємності $0,07\text{--}0,09$ МПа.

Також велику роль в отриманні товарної фракції відіграє місце подачі плаву на тарілку гранулятора. Місцезнаходження зони розпилення плаву відносно площини тарілки зумовлює гранулометричний склад гранульованого продукту. Із графічної залежності (рисунок 8) витікає, що більший вміст товарної фракції у готовому продукті спостерігається при зрошенні плавом шару, який піднімається, у лівому секторі верхньої частини тарілки (дослід 2, рисунок 8). Це обумовлюється більш значною довжиною траєкторії руху гранул (у порівнянні з дослідом 1 та 3, рисунок 8) за рахунок дії на них сил тертя кочення, що обумовлює більш тривале нашарування матеріалу по поверхні гранул і послідує їх зміцнення.

Представлені результати досліджень було отримано на експериментальній установці з діаметром тарілки до 1 м. При масштабному переході до промислових умов слід використовувати декілька (чи інші типи) форсунок і пристрої теплової енергії.

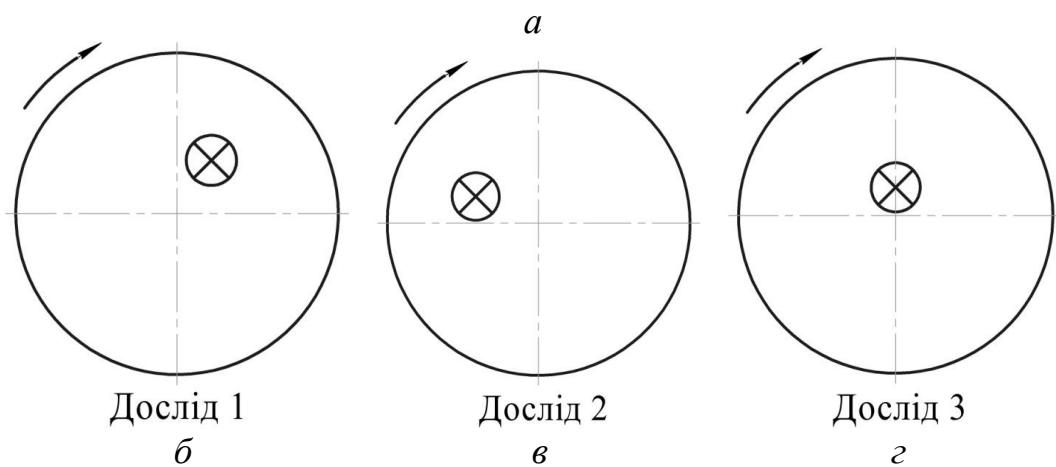
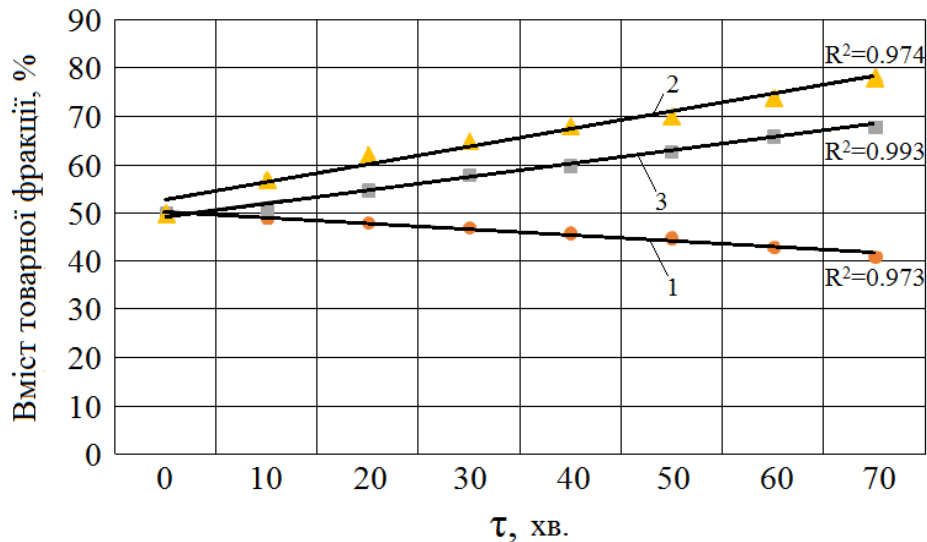


Рисунок 8 – Залежність вмісту товарної фракції у гранульованому продукті від часу процесу при різних способах подачі плава: *a* – графік залежності вмісту товарної фракції від часу; лінія 1 – за умов подачі плава у правий верхній сектор тарілки; лінія 2 – за умов подачі плава у лівий верхній сектор тарілки; лінія 3 – за умов подачі плава у центральний сектор тарілки; *б* – схема подачі плава у правий верхній сектор тарілки; *в* – схема подачі плава у лівий верхній сектор тарілки; *г* – схема подачі плава у центральний сектор тарілки

Викладено теоретичні закономірності температурного профілю у двошаровій гранулі. Двошарова гранула з органічною оболонкою являє собою тверде ядро, то є первинна гранула азотних добрив – аміачна селітра або карбамід. На ядро, у процесі гранулювання у стані псевдозрідження, наноситься шар суспензії органічного походження. У процесі теплового сушіння зовнішньої оболонки гранула набуває пористу оболонку певної структури. Пористість оболонки (розмір пор, форма їх поверхні і характер) залежить від температури газового потоку і тривалості прогрівання гранул.

Теоретично проаналізовано вплив пористої структури оболонки на характер теплопровідності. Швидкість процесу нагрівання гранул і, відповідно, інтенсивність зміни температурного профілю за рівнянням, визначається величиною коефіцієнта теплопровідності матеріалу гранули. Даний параметр входить у критерії Біо та Фур'є через коефіцієнт теплопровідності.

Модифікований коефіцієнт «стисненої» теплопровідності через пористий шар дорівнює:

$$\lambda_{CT} = \frac{\lambda_E}{k_\phi \cdot k_I \cdot k_P}, \quad (7)$$

де λ_E – ефективний коефіцієнт теплопровідності, що залежить від пористості шару ε , $\lambda_E = f(\varepsilon)$, $0 < \varepsilon < 1$; k_ϕ – коефіцієнт форми часу; k_I – коефіцієнт звивистості пор; k_P – коефіцієнт розміру пор.

Усереднена величина ефективного коефіцієнта теплопровідності дорівнює:

$$\lambda_E = \frac{0,5[(1-\varepsilon)\lambda_T + \varepsilon\lambda_G][(1-\varepsilon)\lambda_T + \varepsilon\lambda_T] + \lambda_T\lambda_G}{(1-\varepsilon)\lambda_T + \varepsilon\lambda_T}. \quad (8)$$

Аналізуючи рівняння (7) та (8) бачимо, що зі збільшенням пористості шару, величина коефіцієнта теплопровідності зменшується. Інтерес представляє з'ясування самого характеру та інтенсивності цього зменшення, оскільки теплопровідність твердого скелета гранули в десятки разів перевищує теплопровідність газу всередині пор.

Рівняння (8) застосовуються при визначенні температури поверхні двошарової гранули та температурного профілю в межах $0,7 \cdot R < r < R$. При визначенні температури в центрі гранули, температурного профілю при $r < 0,7 \cdot R$ враховується величина теплопровідності твердої складової гранули λ_T . При визначенні середньооб'ємної температури двошарової гранули слід враховувати приведений коефіцієнт теплопровідності згідно рівняння:

$$\lambda_{HP} = 0,7\lambda_T + 0,3\lambda_E. \quad (9)$$

Теоретичні результати отримані порівняно для суцільної гранули при пористості $\varepsilon = 0$ та пористої гранули при значеннях $0,1 \leq \varepsilon \leq 0,7$.

Середньооб'ємна температура нагрівання гранули до певної температури визначається як:

$$t = t_c - (t_c - t_n) \frac{6A_2}{\mu_1^2} \exp(-\mu_1^2 \frac{\lambda_E \cdot \tau}{c \cdot \rho \cdot R^2}), \quad (10)$$

а час нагрівання гранули:

$$\tau_H = \frac{R^2 \cdot c \cdot \rho}{\lambda_E \cdot \mu_1^2} \ln \left[\frac{6A_2}{\mu_1^2 \left(\frac{t_c - t}{t_c - t_n} \right)} \right]. \quad (11)$$

Це доводиться характером кривих залежності $t = f(\tau)$ (рисунок 9) при нагріванні гранул у газовому середовищі з початковою температурою 65°C .

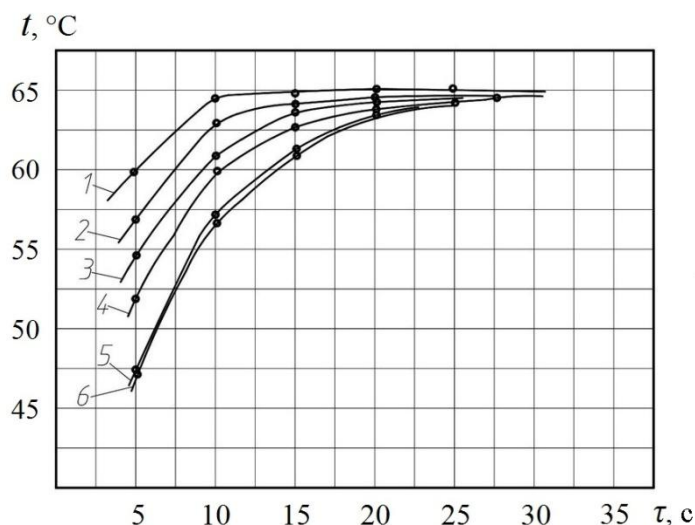


Рисунок 9 – Залежність температури нагрівання гранули від часу:
 1 – $\varepsilon = 0,1$; 2 – $\varepsilon = 0,2$; 3 – $\varepsilon = 0,3$; 4 – $\varepsilon = 0,4$; 5 – $\varepsilon = 0,5$; 6 – $\varepsilon = 0,6$

Залежність $\tau_H = f(\varepsilon)$ показує різке збільшення часу нагріву гранули (вдвічі) при переході від суцільної гранули ($\varepsilon = 0$) до гранули з початковою пористістю ($\varepsilon = 0,1$), далі поступове збільшення часу нагріву при пористості гранули в межах $0,1 < \varepsilon < 0,3$ і подальше швидке збільшення часу нагрівання гранули при пористості в межах $0,3 < \varepsilon < 0,6$. Останнє спричинене значним зменшенням ділянок твердого скелета гранули, які мають менший опір процесу теплопровідності.

Розроблена математична модель кінетики формування оболонки при гранулюванні (капсулюванні) гранул. Прийнято, що збільшення маси на поверхні сферичної гранули відбувається за рахунок утворення плівки плаву (оболонки), яка потім кристалізується при тепловому чи холодному гранулюванні. Також збільшення маси гранули відбувається за рахунок приєднання дрібних частинок ретурю до поверхні гранули (рисунок 10).

Даний процес можна виразити наступним диференціальним рівнянням:

$$dM = (G_{nl} \cdot x_{ms} + G_c) d\tau = (G_0 + G_c) d\tau \quad (12)$$

де dM – приріст маси, кг; G_{nl} – масова витрата плаву, кг/с; G_c – маса дрібних частинок, які закріплюються на вологій поверхні частинок ретурю за 1 с, кг/с; x_{ms} – масова доля сухої речовини (у випадку подачі суспензії), кг/кг; G_0 – витрата матеріалу оболонки, кг/с; τ – час, с.

Прирощена маса гранули за рахунок оболонки:

$$M_{об} = \rho_{об} \cdot V_{об} = \rho_{об} \cdot (V_{zp} - V_{об}) = \rho_{об} \cdot n_p \cdot \frac{\pi}{6} \cdot (D_{об}^3 - D_p^3), \quad (13)$$

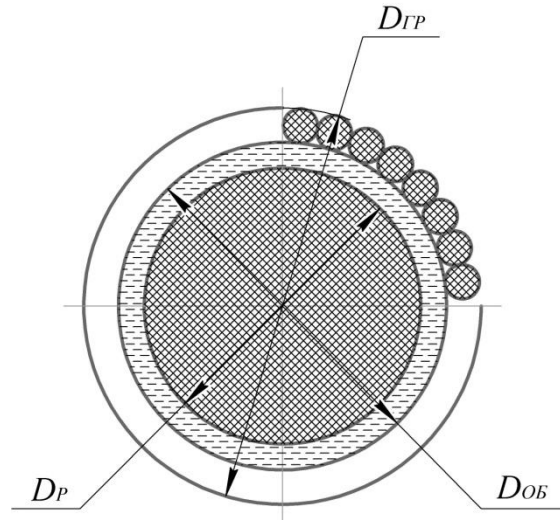


Рисунок 10 – Схема укрупнення гранули:

$D_p, D_{об}, D_{зр}$ – відповідно діаметри отриманої гранули з плавом, гранули ретуру та кінцевий діаметр отримуваної гранули

де $V_{зр}, V_{об}$ – об'єми відповідно отриманої гранули та прирощеної оболонки, м^3 ; $D_{об}, D_p$ – діаметри відповідно отриманої гранули з оболонкою та гранули ретуру, м ; n – кількість частинок ретуру в шарі; $\rho_{об}$ – щільність матеріалу оболонки, $\text{кг}/\text{м}^3$.

На довжині кола (гранула) розміщуються дрібні частинки діаметром $d_ч$ у кількості n :

$$n_ч = \frac{\pi \cdot D_{зр}}{d_ч} = \frac{\pi \cdot (D_p + d_ч)}{d_ч}, \quad (14)$$

де $D_{зр}, d_ч$ – діаметри відповідно дорощеної гранули та дрібних частинок ретуру, м .

У свою чергу, кількість частинок ретуру:

$$n_p = \frac{M_p}{\rho_p \cdot V_{ш} \cdot k_v \cdot (1 - \varepsilon_{ш})}, \quad (15)$$

де M_p – маса ретуру, кг ; $V_{ш}$ – об'єм шару матеріалу, м^3 ; k_v – коефіцієнт заповнення робочого об'єму; ε – порізність шару матеріалу.

Тоді діаметр отриманої гранули дорівнює:

$$D_{зр} = \frac{\left[\rho_{об} \cdot \frac{M_p}{\rho_p \cdot V_{ш} \cdot k_v \cdot (1 - \varepsilon_{ш})} \cdot \pi \cdot (D_{об}^3 - D_p^3) - 6 \cdot G_0 \cdot \tau \right]}{\rho_p \cdot \pi^2 \cdot d_ч^2}. \quad (16)$$

Виразивши товщину оболонки як різницю діаметрів гранули, після математичних перетворень, отримаємо залежність, яка дозволяє спрогнозувати значення товщини оболонки (шару) у будь-який момент часу:

$$\delta = \frac{1}{2} \sqrt[3]{\frac{D_p^3 \cdot \rho_{zp} \cdot g_0 \cdot \tau}{\rho_{ob}} + D_p^3} - D_p = \frac{D_p}{2} \cdot \left(\sqrt[3]{g_0 \cdot \frac{\rho_{zp}}{\rho_{ob}} \cdot \tau + 1} - 1 \right). \quad (17)$$

З рівняння (17) отримуємо вираз для визначення питомої витрати суспензії в залежності від прирощеного шару та часу обробки гранул у грануляторі:

$$g_0 = \frac{2 \cdot \delta^3 \cdot \rho_{ob}}{\rho_{zp} \cdot D_p^3 \cdot \tau}. \quad (18)$$

Рівняння (17) та (18) справедливі лише для одноступневих грануляторів псевдозрідженого шару. Для багатоступневих грануляторів дані рівняння розписуються, згідно з осередковою моделлю, для кожного ступеня у вигляді таких рівнянь:

$$\left\{ \begin{array}{l} \delta_1 = \frac{D_p}{2} \cdot \left(\sqrt[3]{g_{01} \cdot \frac{\rho_{zp}}{\rho_{ob}} \cdot \tau_1 + 1} - 1 \right); \\ \delta_2 = \frac{(D_p + 2\delta_1)}{2} \cdot \left(\sqrt[3]{g_{02} \cdot \frac{\rho_{zp}}{\rho_{ob}} \cdot \tau_2 + 1} - 1 \right); \\ \delta_3 = \frac{(D_p + 2\delta_1 + 2\delta_2)}{2} \cdot \left(\sqrt[3]{g_{03} \cdot \frac{\rho_{zp}}{\rho_{ob}} \cdot \tau_3 + 1} - 1 \right); \\ \delta_n = \frac{(D_p + 2\delta_1 + 2\delta_2 + 2\delta_n)}{2} \cdot \left(\sqrt[3]{g_{0n} \cdot \frac{\rho_{zp}}{\rho_{ob}} \cdot \tau_n + 1} - 1 \right). \end{array} \right. \quad (19)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} g_{01} = \frac{2\delta_1^3 \cdot \rho_{ob}}{\rho_{zp} \cdot D_p^3 \cdot \tau}; \\ g_{02} = \frac{2\delta_2^3 \cdot \rho_{ob}}{\rho_{zp} \cdot (D_p + 2\delta_1)^3 \cdot \tau}; \\ g_{03} = \frac{2\delta_3^3 \cdot \rho_{ob}}{\rho_{zp} \cdot (D_p + 2\delta_1 + 2\delta_2)^3 \cdot \tau}; \\ g_{0n} = \frac{2\delta_n^3 \cdot \rho_{ob}}{\rho_{zp} \cdot (D_p + 2\delta_1 + 2\delta_2 + 2\delta_n)^3 \cdot \tau}. \end{array} \right. \quad (20)$$

Аналіз залежностей (19) та (20) показує, що кінетика укрупнення гранул у завислому шарі залежить від початкового розміру частинок ретур, питомої витрати, густини суспензії та самих гранул, а також від часу нанесення покриття на поверхню гранули.

У таблиці 1 представлено результати розрахунків товщини оболонки за ступенями грануляції у багатоступеневому грануляторі псевдозрідженого шару за рівнянням (19).

Таблиця 1 – Товщина оболонки за ступенями грануляції

Ступінь грануляції	Питома витрата суспензії, кг/(кг·с)	Товщина оболонки, мм
Перший	$2 \cdot 10^{-4}$	0,028
	$3 \cdot 10^{-4}$	0,042
	$4 \cdot 10^{-4}$	0,055
Другий	$2 \cdot 10^{-4}$	0,029
	$4 \cdot 10^{-4}$	0,056
	$10 \cdot 10^{-4}$	0,132
Третій	$2 \cdot 10^{-4}$	0,030
	$20 \cdot 10^{-4}$	0,920

Дані таблиці 1 демонструють, що за невеликих питомих витрат суспензії $(2-5) \cdot 10^{-4}$ кг/(кг·с) отримуємо незначний приріст товщини оболонки зі збільшенням числа ступенів гранулювання. Тобто, з метою дорошування гранул від вихідного діаметра 2 мм до готових гранул 2,5–4 мм, необхідно здійснювати процес у трьох- і більше ступеневих грануляторах псевдозрідженого шару. При цьому, питома витрата суспензії становить $(10-20) \cdot 10^{-4}$ кг/(кг·с).

У процесі лабораторних досліджень температура під газорозподільною решіткою регулювалася в межах 50–100 °С, при цьому температура повітря в шарі гранул становила 40–80 °С. Таке падіння температури пояснюється тим, що у шар киплячих гранул постійно вводиться волога суспензія, яка, випаровуючись, відбирає тепло.

На рисунку 11 наведено зрізи гранул, які отримані за температур 70–80 °С, що відповідають оболонковому режиму з тріщинами. За отриманими зрізами видно, що гранули, які отримано при температурі 70 °С (рисунок 11, а), характеризуються більш щільною структурою. Це забезпечує пролонгованість дії отриманого продукту, оскільки динаміка руйнування частинки напряму залежить від того, з якою швидкістю волога дифундує всередину гранули.

Також відзначимо, що у процесі капсулювання крива розподілу змінює свою форму та має один характерний максимум (рисунок 12). Це означає, що за робочих умов капсулювання органічна речовина закріплюється на поверхні частинок міцним шаром і не відбувається її сколювання в окремих місцях гранули. Наявність максимуму на кривій розподілу спостерігаються і зі збільшенням часу процесу капсулювання та навантаження по суспензії.

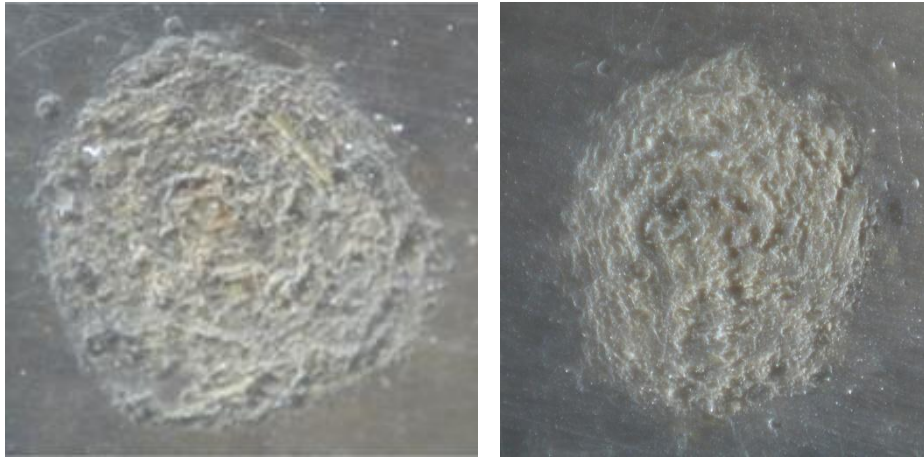
*a**б*

Рисунок 11 – Зрізи гранул (збільшення в 20 разів), що одержані при температурі: *a* – 70°C; *б* – 80°C

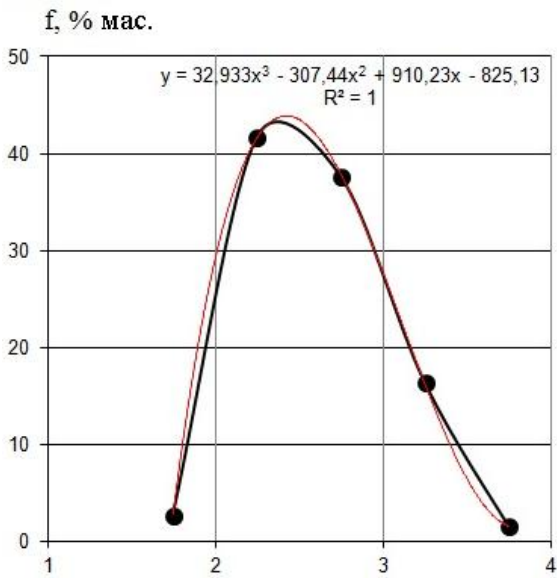
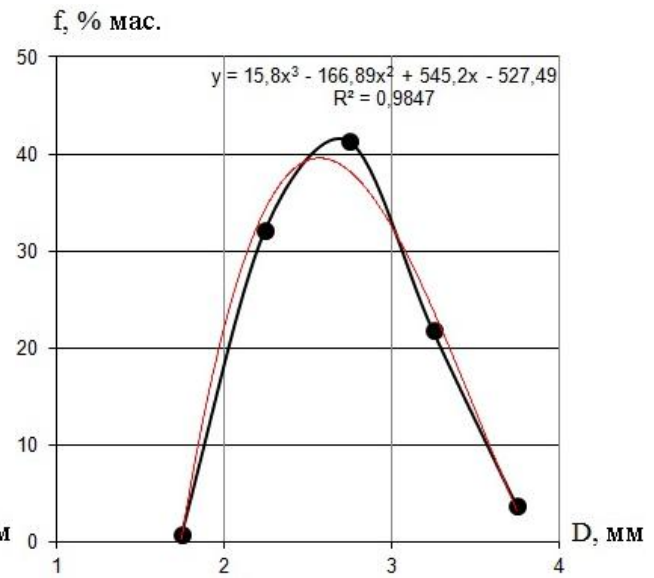
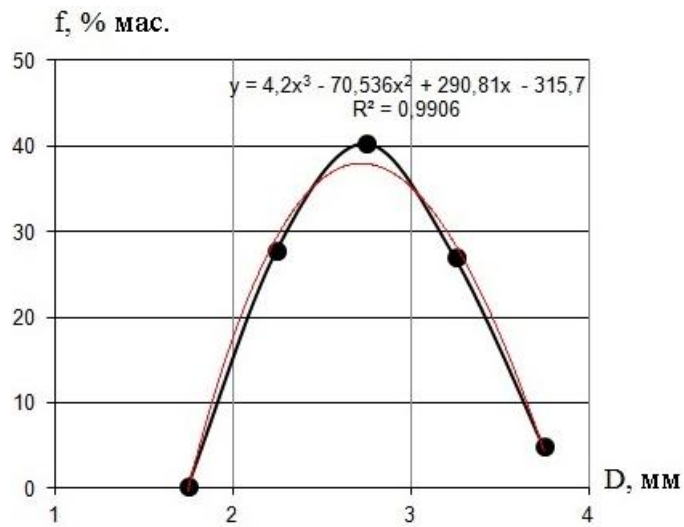
*a**б**в*

Рисунок 12 – Розподіл частинок за розмірами при витраті суспензії $g_0 = 1,86 \cdot 10^{-4}$ кг/(кг·с) у моменти часу: *a* – 20 хв.; *б* – 40 хв.; *в* – 60 хв.

Четвертий розділ присвячений теоретичним та експериментальним дослідженням процесів формування гранул у багатоступневих апаратах зваженого шару. Такий апарат являє собою вертикальний канал прямокутного перетину, в якому по висоті розташовані перфоровані похилі полиці з відповідними конструктивними параметрами (рисунок 13).

Ширина розвантажувального простору виражається відношенням l/B , де l – відстань між кінцем полиці та стінкою апарата, а B – довжина сторони перерізу апарата. Змінюючи величину відношення l/B , живий переріз полиці f_n і кут її нахилу до горизонту α_n , можна впливати на розподіл повітря між розвантажувальним простором і отворами полиці.

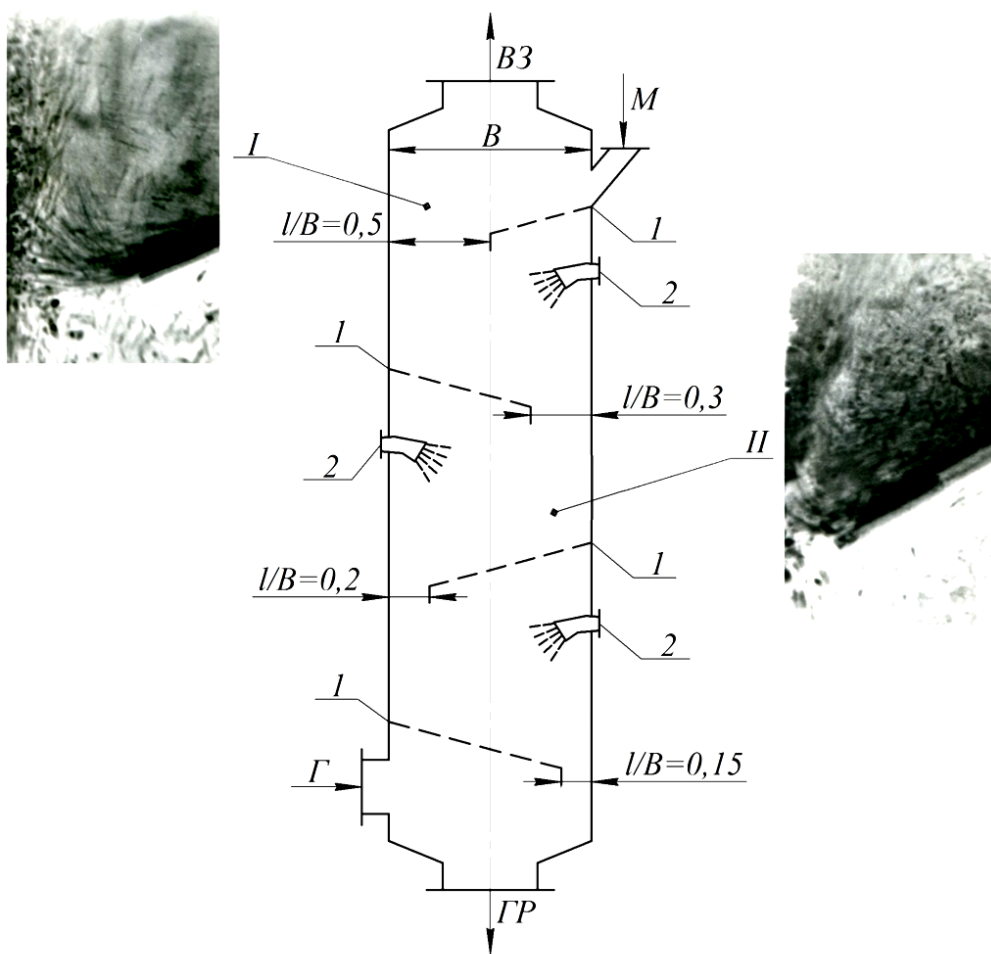


Рисунок 13 – Багатоступневий гранулятор зваженого шару:

- I – секція класифікації; II – секція гранулювання (укрупнення гранул);
- 1 – перфоровані полиці; 2 – пневматичні форсунки для розпилення суспензії;
- M – вихідний матеріал (гранули мінеральних добрив); G – газ;
- $BЗ$ – газодисперсна завись; $ГР$ – готові гранули

Експериментально досліджувалась особливість гідродинаміки руху газового потоку в поличному апараті зваженого шару. Встановлення у робочому просторі поличного апарата похилої перфорованої полиці, за рахунок звуження вільного перерізу вертикального каналу, викликає місцеве збільшення швидкості та турбулентності газового потоку в розвантажувальному просторі та зміну характеру розподілу швидкостей під поверхнею полиці та над нею. Як

видно з рисунку 14 (криві 1 і 2), зменшення величини відношення l/B від 0,5 до 0,15, значно підвищує нерівномірність розподілу газового потоку по перерізу робочого простору апарата, у порівнянні з установкою перфорованої решітки, яка перекриває переріз робочого простору апарата повністю (апарат киплячого шару (рисунок 14, крива 4)), або вільного каналу (апарат типу пневмотруб (рисунок 14, крива 5)).

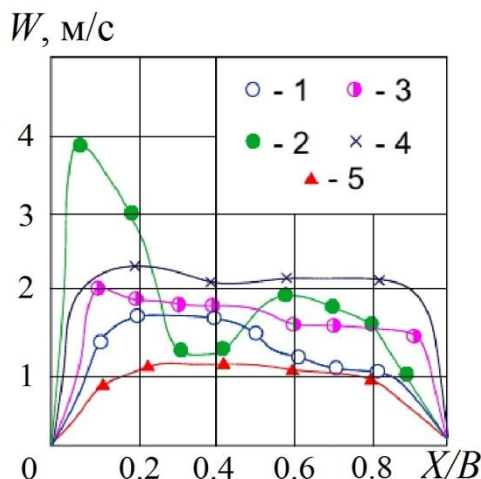


Рисунок 14 – Профіль швидкостей газового потоку по довжині перетину апарата в місці встановлення полиці:

1 – $l/B = 0,5$, $\psi = 15\%$; 2 – $l/B = 0,15$, $\psi = 15\%$; 3 – $l/B = 0,15$, $\psi = 30\%$;
4 – $l/B = 0$; 5 – $l/B = 1$. Кут нахилу полиці $\gamma = 25^\circ$.

Швидкість газового потоку у вільному перетині – 1,2 м/с

Якщо при $l/B = 0,5$ і живому перерізі полиці рівним 15 % (рисунок 14, крива 1) у надполичному просторі абсолютні значення швидкостей газового потоку практично постійні за перерізом цього простору і досягають максимуму тільки у розвантажувальному просторі і над ним, то при $l/B = 0,15$ (рисунок 14, крива 2) швидкісний профіль має два максимальні значення: у зоні над розвантажувальним простором і на рівні середини похилої полиці. Це пояснюється впливом різної «ділильної» дії похилої полиці на розподіл газового потоку, що йде в тій чи іншій кількості через розвантажувальний простір та отвори похилої полиці. Збільшення живого перерізу похилої полиці до 30 % (рисунок 14, крива 3) вирівнює нерівномірність швидкісного профілю перерізу робочого об'єму апарата, оскільки газовий потік перерозподіляється в отвори полиці за рахунок зменшення гідравлічного опору полиці його проходу.

При подальшому зменшенні величини відношення l/B аж до 0,15, швидкість газового потоку в розвантажувальному просторі зростає в 2,5–3 рази, у порівнянні із середньою швидкістю газового потоку у вільному перерізі робочого об'єму апарата. Швидкість газового потоку в розвантажувальному просторі досягає свого максимального значення щодо $l/B = 0,15$ для полиць із живим перерізом від 0 до 30 %.

Проведено фізичне моделювання гідродинамічної структури руху газодисперсного потоку у гравітаційному поличному апараті.

На рисунку 15 наведена візуальна картина потоків у поличному апараті, реалізована в програмному продукті «Ansys CFX». Частинки дрібної фракції (менше 1 мм) умовно позначені точками жовтого кольору, у той час як гранули товарної фракції позначені точками зеленого та червоного кольорів.

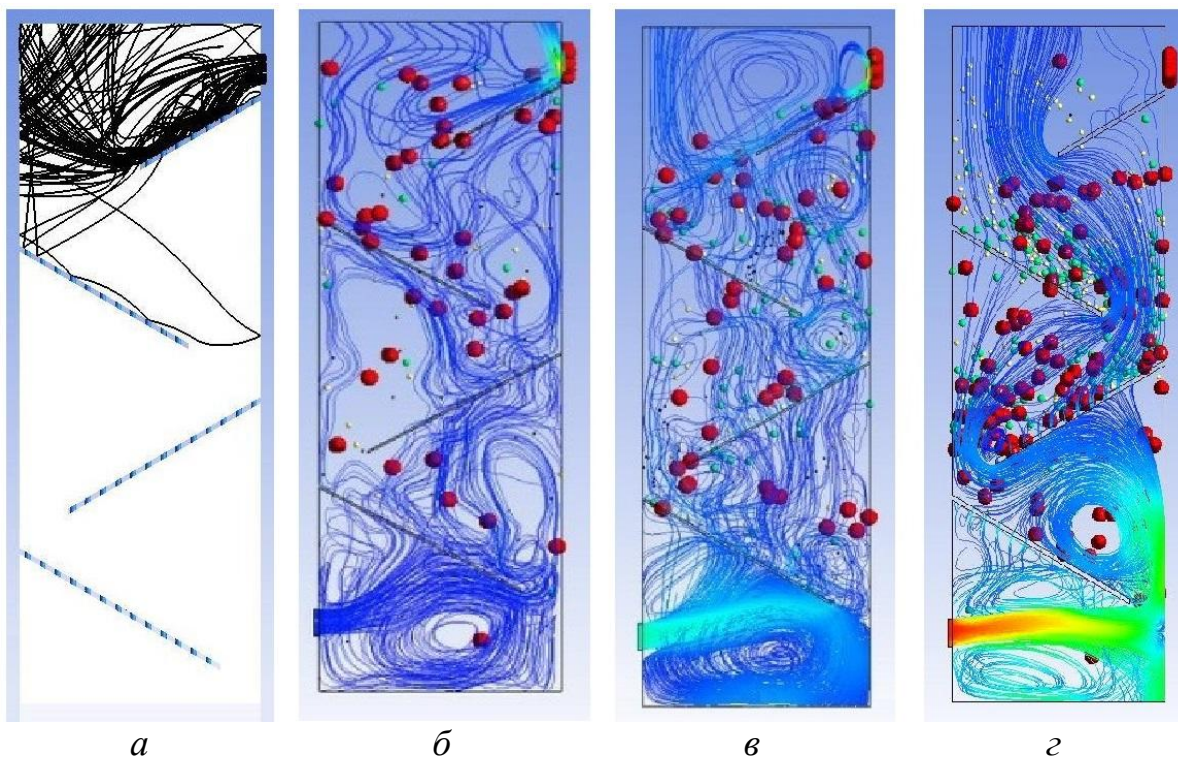


Рисунок 15 – Візуалізація потоків в поличному апараті, реалізована у програмному продукті «Ansys CFX»:

a – виділення дрібної фракції; *б* – перехідний режим роботи апарата; *в* – зважений шаровий режим руху дисперсного матеріалу; *г* – розвинутий зважений шаровий режим руху дисперсного матеріалу

На верхній полиці, при її встановленні в корпусі апарата з відношенням $l/B = 0,5$ (рисунок 13), реалізується виділення дрібної пилоподібної фракції ретуру. Даний ефект змодельований і показаний (рисунок 15, *a*) у вигляді висхідних траєкторій (так званих «треків») руху дрібних частинок при їх виносі до сепараційної зони. Ця модель руху підтверджується реальною картиною руху дисперсного потоку (рисунок 16, *a*).

Після виділення з ретурної суміші дрібних фракцій, матеріал надходить у зону гранулювання та теплового сушіння. У цій зоні, при встановленні полиць зверху вниз із відношенням від $l/B = 0,3$ до $l/B = 0,15$, відповідно реалізуються більш активні гідродинамічні режими зважування твердої фази газовим потоком – від перехідного до режиму розвиненого зваженого шару (рисунок 15, *б, в, г*). Представлені результати моделювання потоків підтверджують реальну картину гідродинаміки руху газодисперсного потоку (рисунок 16, *б, в*), тобто від верхньої до нижньої полиці інтенсивність завихрень зваженого шару збільшується.

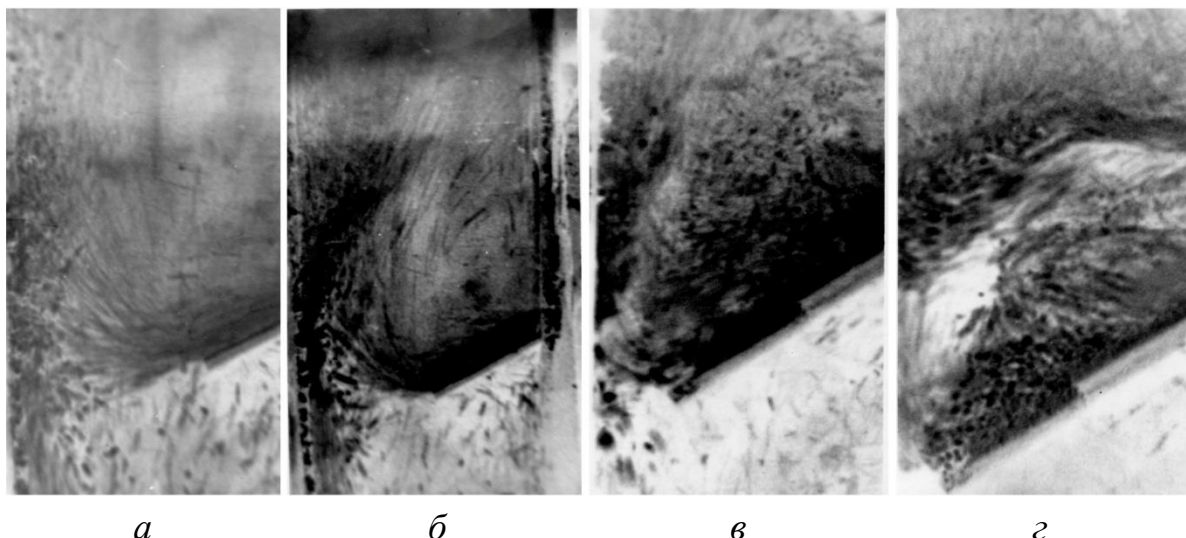


Рисунок 16 – Фотографічне зображення гідродинамічних режимів:
a – режим гравітаційно-падаючого шару; *б* – перехідний режим;
в – режим зваженого шару; *г* – поршневий режим.

Фотографії зроблені при стробоскопічному освітленні з частотою 32 кадри/с

Досліджено механізм зважування твердої фази газовим потоком у вертикальному каналі із розташованою в ньому похилої перфорованої полиці. При встановленні в робочому просторі апарата полиці з відношенням $l/B = 0,15-0,2$ реалізується активний гідродинамічний режим – «зваженого шару» (рисунок 17). Даний гідродинамічний режим характеризується утворенням активно циркулюючого вихрового шару гранул над поверхнею похилої перфорованої полиці. За рахунок змішування безперервно циркулюючих частинок твердої фази з новою порцією частинок, які надходять на полицю, спостерігається стабілізація висоти зваженого шару і він досягає стаціонарного стану за своєю гідродинамічною структурою. При цьому шар гранул на поверхні перфорованої похилої полиці являє собою флюїдизований шар, що продувається газовими струменями, які виходять із отворів полицного контакту (зона I).

Над поверхнею полиці утворюється вихровий шар (зона II), в якому гранули активно переміщуються і контактують із газовим струменем (зона III), який формується зазором між кінцем полиці та боковою стінкою апарата. При реалізації такого активного гідродинамічного режиму значно інтенсифікуються тепломасобмінні процеси.

Зважений над розвантажувальним простором шар матеріалу безперервно пульсує. Такий шар неоднорольний у своєму об'ємі та з часом локальна порізність у різних точках шару змінюється через безперервний циркуляційний рух частинок матеріалу.

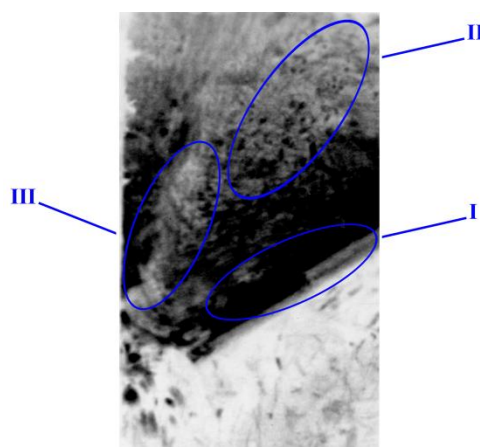


Рисунок 17 – Фотографічне зображення гідродинамічного режиму «зваженого шару» на похилій перфорованій полиці

Швидкість, за якої здійснюється перехід у гідродинамічний режим зваженого шару, назвемо критичною швидкістю початку зважування. Величина даної швидкості визначається з емпіричної залежності вигляду:

$$Re_{кр} = Re_B \cdot [1,19 \cdot \lg(100 \cdot \psi) + 0,005] \cdot \left(\frac{l}{B}\right). \quad (21)$$

де l – відстань між кінцем полиці та стінкою апарата, м; B – довжина сторони перерізу апарата, м; ψ – ступінь перфорації полиці, %; Re_B – критерій Рейнольдса для умов витання частинок середнього розміру в газовому потоці.

Як видно з траєкторій руху твердої фази (рисунок 17), зважений шар можна розділити на дві зони: зону руху твердих частинок по поверхні полиці (зона I) та зону руху частинок у надполичному просторі (зона II).

Для першої зони час перебування частинок визначиться за рівнянням:

$$\tau_1 = \frac{L_{sh}}{u_p \cdot (1-\beta)^m} = \frac{L_{dev} - \frac{L_{cl}}{L_{dev}}}{u_p \cdot (1-\beta)^m}, \quad (22)$$

де u_p – швидкість руху твердих частинок по поверхні полиці, м/с; β – об'ємна концентрація твердої фази у завислому шарі, м³/м³; m – дослідний коефіцієнт, для режиму «зваженого шару» $m = 4,4-4,5$.

Для визначення об'ємної концентрації твердої фази у завислому шарі пропонується емпірична кореляція виду:

$$\beta = n \cdot G_{ex}^{0,95} \cdot \left(\frac{W}{W_{so}}\right)^{0,6}, \quad (23)$$

де G_{ex} – витратна масова концентрація, кг/кг, $G_{ex} = G_g/G_g$; G_g – масова витрата матеріалу, кг/с; G_g – масова витрата газу, кг/с; W – швидкість газового потоку у вільному перерізі, м/с; W_{so} – швидкість витання частинок середнього діаметра, м; n – дослідний коефіцієнт, для режиму «зваженого шару» $n = 0,25-0,35$.

У другій зоні частинки здійснюють рух висхідною траєкторією до верхньої межі зваженого шару і по низхідній траєкторії до поверхні полиці. Тоді час перебування частинок оцінюється як:

$$\tau_2 = \frac{L_{mp}}{\mathcal{G}_r} = \frac{2 \cdot k \cdot B}{\mathcal{G}_r}, \quad (24)$$

де L_{mp} – довжина траєкторії, м; \mathcal{G}_r – пульсаційна швидкість твердої частинки, м/с; k – дослідний коефіцієнт, $k = (1,5-3) \cdot B$.

Пульсаційна швидкість твердої частинки у зваженому шарі визначається за емпіричною залежністю виду:

$$g_r = W(\exp)^{-c}, \quad (25)$$

де c – дослідний коефіцієнт, $c = 2,8$.

Розрахунки показують, що для режиму «зваженого шару» за швидкості газового потоку у вільному перерізі 2,4 м/с маємо: швидкість витання частинок середнього діаметра 2 мм – 10–12 м/с; витратну масову концентрацію – 3 кг/кг; об'ємну концентрацію твердої фази у зваженому шарі – 0,34 м³/м³; швидкість частинки по поверхні полиці – 0,1 м/с; час перебування частинки для першої зони – $\tau_1 = 5,73$ –5,97 с. Для другої зони, при пульсаційній швидкості частинок у шарі 0,14 м/с час перебування $\tau_2 = 2$ с. Загальний розрахунковий час перебування частинок у зваженому шарі $\tau_{\Sigma} = 7,73$ –7,97 с. Експериментальний час перебування частинок у шарі (вимірювався як відношення кількості матеріалу у зваженому шарі до його масової витрати) становить $\tau_{ex} = 7,72$ с.

Результати розрахунків (таблиця 2) показують, що час перебування частинок у шарі зростає зі збільшенням об'ємної концентрації твердої фази у шарі та числа полиць, що призведе до збільшення виходу в товарному продукті більш крупних фракцій.

Таблиця 2 – Час перебування твердих частинок у полицному апараті

Режим / концентрація, β , м ³ /м ³	Час перебування частинок при кількості полиць, с				
	1	2	3	4	5
Зважений шар / 0,3	7,2	12,4	17,6	23,0	28,0
Зважений шар / 0,35	9,2	16,4	24,0	31,0	38,0

У полицному грануляторі частинки ретурю надходять у секцію пневмокласифікації, в якій шар матеріалу піддається сепарації на похилій (до 25°) перфорованій полиці з живим перерізом 5 % і відношенням $l/B = 0,5$. Дрібні частинки матеріалу виносяться зі зваженого шару в надшаровий простір (рисунок 18).

Можна виділити два види виносу:

1) кінетичний, при якому дрібні частинки виносяться газовим потоком за умови, що швидкість їх витання у потоці менша за швидкість газу;

2) динамічний (інерційний), при якому відбувається викидання частинок у надшаровий простір.

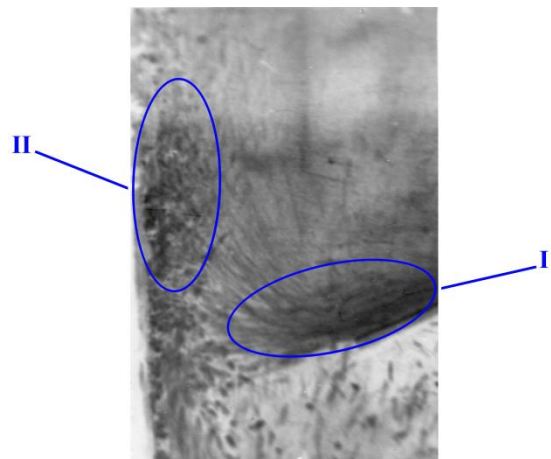


Рисунок 18 – Фотографічне зображення гідродинамічного режиму гравітаційно падаючого шару із сепарацією гранул на похилій перфорованій полиці

Перший вид виносу обумовлюється кінетичною енергією газового потоку і ґрунтується на рівноважному співвідношенні швидкостей витання частинок та швидкостей газового потоку у надшаровому просторі. На сепаруючій полиці кінетичний виніс забезпечується впливом газових струмків, які виходять із отворів полиці, і плоского газового струменя, що виходить із розвантажувальної щілини. На фотографічному зображенні (рисунок 18) такий виніс фіксується наявністю треків траєкторій руху дрібних частинок, які «вибиваються» із шару і під впливом газового потоку рухаються вгору, у сепараційний простір (зона I). Другий вид виносу зумовлений кінетичною енергією частинок за рахунок їх зіткнення зі стінками апарата та подальшого відскоку в бік, де вони підхоплюються газовим потоком (зона II).

Механізм винесення дрібних фракцій матеріалу з шару в надшаровий простір виражається диференціальним рівнянням виду:

$$\begin{aligned} \frac{\partial Y_m(\tau)}{\partial \tau} &= (U_m \text{grad} Y_m) + K_\epsilon (Y_m^* - Y_m(\tau)) = \\ &= \left(U_{mx} \frac{\partial Y_m}{\partial x} + U_{my} \frac{\partial Y_m}{\partial y} + U_{mz} \frac{\partial Y_m}{\partial z} \right) - K_\epsilon (Y_m^* - Y_{m.u}(\tau)), \end{aligned} \quad (26)$$

де U_{mx} , U_{my} , U_{mz} – швидкість твердих частинок відносно осей x , y , z , м/с; $Y_m(\tau)$ – поточна концентрація частинок дрібної фракції в газовому потоці (у надшаровому (сепараційному) просторі), г/м³; Y_m^* – гранична концентрація частинок дрібної фракції в газовому потоці (у надшаровому (сепараційному) просторі), г/м³; $Y_{m.u}(\tau)$ – концентрація частинок дрібної фракції у шарі; τ – час, с; K_ϵ – константа швидкості виносу, с⁻¹.

Враховуючи, що пневмотранспортний потік у сепараційному просторі спрямований по вертикалі і зміна концентрації дрібної фракції в потоці відбувається також у вертикальній площині, то допускаємо:

$$\frac{\partial Y_m}{\partial x} = 0; \quad \frac{\partial Y_m}{\partial y} = 0. \quad (27)$$

Оскільки у промислових апаратах здійснюється безперервний процес, то $\partial Y_{sm}(\tau) / \partial \tau = 0$. Враховуємо, що поточна координата z відповідає висоті сепараційного простору h . Тоді рівняння (26) запишеться як:

$$U_m \frac{dY_m}{dh} = -K_\epsilon (Y_m^* - Y_{m.u}). \quad (28)$$

Рівняння (28) характеризує кінетичний виніс, обумовлений виносом з шару дрібних частинок, швидкість витання яких менша за швидкість газового потоку, і динамічний (інерційний), обумовлений кінетичною енергією дрібних частинок, які виносяться з поверхні зваженого шару.

Інтегруючи рівняння (28)

$$\int_{Y_M}^{Y_M^*} \frac{dY_M}{(Y_M^* - Y_{M.u})} = -\frac{K_g}{U_m} \int_0^h dh, \quad (29)$$

отримуємо:

$$\ln \frac{Y_M}{(Y_M^* - Y_{M.u})} = -\frac{K_g \cdot h}{U_m}. \quad (30)$$

Далі, перетворюючи:

$$\lg Y_M = \lg(Y_M^* - Y_{M.u}) - 2,3 \frac{K_g \cdot h}{U_m}. \quad (31)$$

Гранична концентрація частинок дрібної фракції у газовому потоці Y_M^* відповідає граничній концентрації частинок даної крупності ($Y_{k.u}$), яка може виникнути в потоці за його повного «насичення» зваженими частинками, тобто $Y_M^* = Y_{k.u}$. В ідеальному випадку, при повному вилученні з шару дрібних частинок, $Y_{M.u} = 0$. Для стаціонарної ділянки сепараційного простору швидкість частинок (U_m) близька до швидкості потоку (w), тому в рівнянні (31) $U_m = w$.

Тоді:

$$\lg Y_M = \lg Y_M^* - 2,3 \frac{K_g \cdot h}{U_m} = \lg Y_{k.u} - \frac{b}{w}. \quad (32)$$

Замінивши $a = \lg Y_{k.u}$ і $b = 2,3 \cdot K_g \cdot h$, отримаємо рівняння для визначення концентрації (г/м^3) частинок окремої монофракції в газовому потоці на виході із сепараційної зони апарата:

$$\lg Y_M = a - \frac{b}{w}. \quad (33)$$

Між постійними « a » і « b » рівняння (35) та швидкістю витання існують функціональні зв'язки у вигляді залежностей:

$$a = m_1 \cdot 10^{-\left(\frac{n_1}{u_s}\right)}; \quad b = m_2 \cdot u_s^{n_2}. \quad (34)$$

На рисунку 19, a представлено залежності концентрації дрібних частинок розміром менше 1 мм від ширини розвантажувального простору.

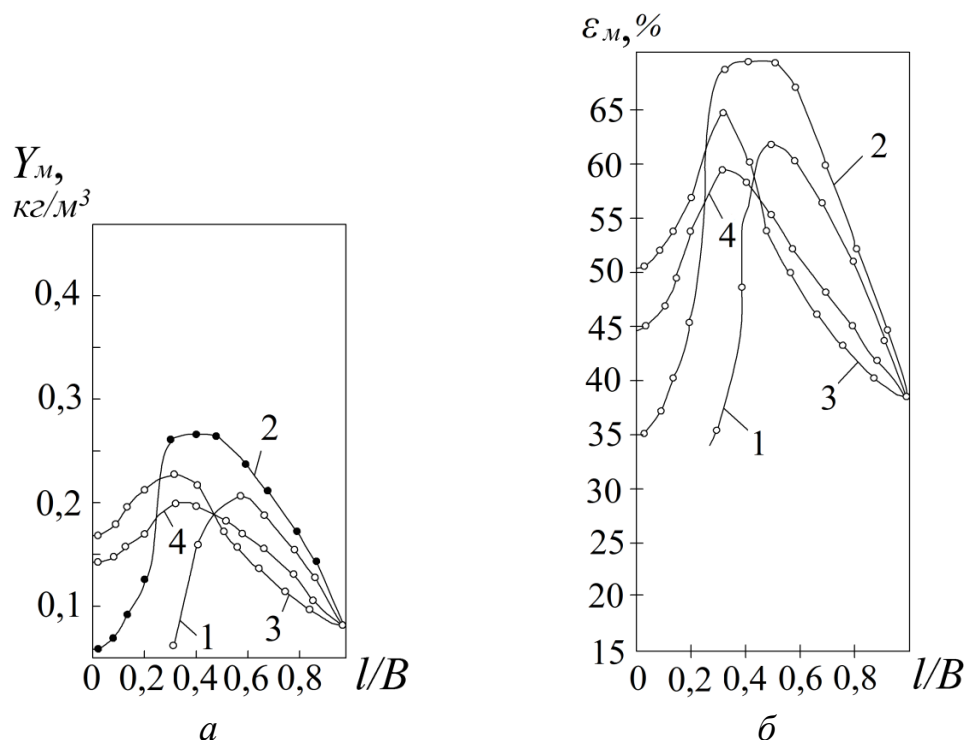


Рисунок 19 – Вплив конструктивних параметрів полиці на винесення дрібної фракції з шару: *a* – залежність величини виносу від ширини розвантажувального простору; *б* – залежність ефективності вилучення від ширини розвантажувального простору. Ступінь перфорації полиці: 1–4 – відповідно 0, 5 %, 15 %, 30 %. Кут нахилу полиці – 30°. Матеріал – гранульований суперфосфат (витрата – 6 кг/(м²·с))

На рисунку 19, *б* представлено залежності ефективності вилучення фракції менше 1 мм у виніс від ширини розвантажувального простору. Кожна крива відповідає певному ступеню перфорації полицного контакту.

Ефективність вилучення дрібної фракції (менше 1 мм) у виніс, при величині відношення $l/B = 0,5$, має максимальне значення для полиці з живим перерізом рівним 5 % і мінімальне, для полиці з живим перерізом рівним 15 %. При встановленні в робочому об'ємі апарата суцільної полиці ($f_n = 0$) весь газовий потік проходить через розвантажувальний простір, зумовлюючи вилучення дрібної фракції матеріалу саме в цій зоні. Наявність перфорації у полиці (живий переріз до 5 %) викликає перерозподіл газового потоку, направляючи його частину в отвори полиці. При цьому газовий потік інтенсивно взаємодіє з матеріалом не тільки в зоні розвантажувального простору, а й на поверхні полиці. Це зумовлює підвищення ефективності вилучення дрібної фракції матеріалу на 20 % в апаратах з перфорованими полицями, у порівнянні з апаратами із суцільними полицями. Подальше зменшення ефективності вилучення дрібної фракції у виніс зі збільшенням живого перерізу похилої полиці до 15 % викликано посиленням ефекту перерозподілу газового потоку. Швидкість газового потоку в розвантажувальному просторі зменшується настільки, що процес вилучення дрібної фракції матеріалу в цій зоні не досить інтенсивний, а кількість отворів ще й не забезпечує достатнього контакту фаз.

На рисунку 20 показано залежності концентрацій окремих фракцій у виносі від швидкості газового потоку в робочому об'ємі апарата у вигляді функції $\lg y = f(l/w)$.

Характер залежностей підтверджує збільшення концентрації частинок у потоці з підвищенням швидкості газового потоку у вільному перерізі апарата. Дослідні дані кожної фракції оброблялися у вигляді залежностей, яким відповідає рівняння виду:

$$\lg y = a - \frac{b}{w}, \quad (35)$$

де a, b – дослідні сталі; y – концентрація частинок у сепараційному просторі апарата, що виносяться газовим потоком, г/м^3 ; w – швидкість газового потоку, м/с .

На основі дослідних даних маємо наступні залежності:

$$a = 3,46 \cdot 10^{-\left(\frac{0,25}{u_s}\right)}; \quad b = 0,044 \cdot u_s^{2,2}, \quad \text{при } u_s \leq 5,1 \text{ м/с}; \quad (36)$$

$$a = 10 \cdot 10^{-\left(\frac{3,5}{u_s}\right)}; \quad b = 0,07 \cdot u_s^{2,2}, \quad \text{при } u_s > 5,1 \text{ м/с}. \quad (37)$$

Рівняння (36) та (37) застосовуються для умов класифікації зернистих матеріалів у поличному апараті. З метою порівняльного аналізу були проведені експериментальні дослідження щодо пневмосепарації полідисперсної суміші гранульованого суперфосфату в апараті псевдозрідженого шару. Для цих умов застосовні такі залежності:

$$a = 5,0 \cdot 10^{-\left(\frac{0,75}{u_s}\right)}; \quad b = 0,15 \cdot u_s^{0,51}, \quad \text{при } u_s \leq 5,1 \text{ м/с}. \quad (38)$$

Рівняння (38) застосовується для умов сепарації гранульованих матеріалів в апараті псевдозрідженого шару.

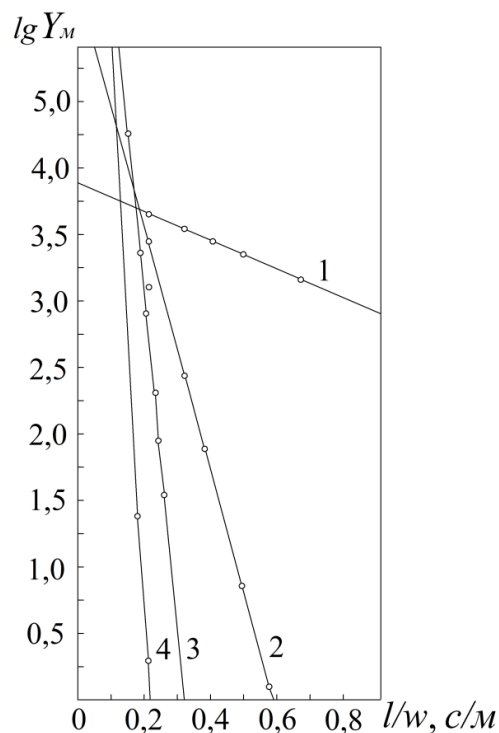


Рисунок 20 – Залежність концентрації частинок у газовому потоці від швидкості повітряного потоку: 1 – фракція $-0,5$ мм; 2 – фракція $+0,5-1$ мм; 3 – фракція $+1-1,6$ мм; 4 – фракція $+1,6-2,5$ мм. Матеріал – гранульований суперфосфат (витрата – $6 \text{ кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$)

У п'ятому розділі представлено теоретичний опис умов впливу на міжфазний теплообмін у неоднорідному середовищі «газ – тверда фаза», а також наведено закономірності охолодження та зміни температури гранул після контакту з повітрям у грануляційній башті.

Для вирішення задачі щодо визначення температури гранули треба знати температуру повітря, що контактує з поверхнею гранул. Тому на першому етапі треба визначити, яким чином та по якій закономірності відбувається підвищення температури повітря за рахунок тепла, яке передається від гранул.

В основу таких розрахунків покладено рівняння теплового балансу:

$$G_{пл} \cdot (c_{пл} \cdot (T_{пл.н} - T_{пл.к}) + z_{кр} + c_{гр} \cdot (T_{пл.к} - T_{гр.к})) = G_{нов} \cdot c_{нов} \cdot (T_{нов.к} - T_{нов.н}), \quad (39)$$

де $c_{пл}$ – питома теплоємність плаву; $z_{кр}$ – питома теплота фазового переходу у результаті кристалізації плаву; $c_{гр}$ – питома теплоємність гранули; $c_{нов}$ – питома теплоємність повітря; $T_{пл.н}$, $T_{пл.к}$ – відповідно початкова та кінцева температури плаву; $T_{гр.к}$ – кінцева температура гранули; $T_{нов.н}$, $T_{нов.к}$ – відповідно початкова та кінцева температури повітря.

У свою чергу, рівняння для визначення температури повітря, що контактує з поверхнею гранули, запишеться у вигляді:

$$T_{нов} = \frac{\tau \cdot T_{нов.к} - \tau \cdot T_{нов.н} + \tau_n \cdot T_{нов.н} - \tau_k \cdot T_{нов.к}}{\tau_n - \tau_k}. \quad (40)$$

Наступним етапом розрахунків є визначення температури у середині гранули за відомими теплофізичними властивостям матеріалу, з якого створюється гранула. За основу таких розрахунків було прийнято відоме диференціальне рівняння теплопровідності:

$$\frac{\partial T(r, \tau)}{\partial \tau} = a \cdot \left(\frac{\partial^2 T(r, \tau)}{\partial r^2} + \frac{2}{r} \frac{\partial T(r, \tau)}{\partial r} \right). \quad (41)$$

Розв'язанням рівняння (41) щодо зміни температури по радіусу гранули у залежності від часу у загальному вигляді буде:

$$T(r, \tau) = T_{нов} + (T_{гр} - T_{нов}) \cdot \left(\sum_{n=1}^{\infty} \frac{2 \cdot (-1)^{n+1} \cdot R \cdot \sin\left(\frac{n \cdot \pi \cdot r}{R}\right) \cdot e^{-\frac{n^2 \cdot \pi^2 \cdot a \cdot \tau}{R^2}}}{r \cdot n \cdot \pi} \right), \quad (42)$$

де $T_{гр}$ – температура поверхні гранули у даний час, що визначається при чисельному розрахунку, як значення температури поверхні гранули, що розраховано під час попередньої ітерації.

Результати розрахунку процесу охолодження гранул у виробництві карбаміду за умови початкової температури гранул $t_{gp.n} = 141^\circ\text{C}$, початкової температури повітря $t_{нов.n} = 40^\circ\text{C}$ наведено на рисунку 21.

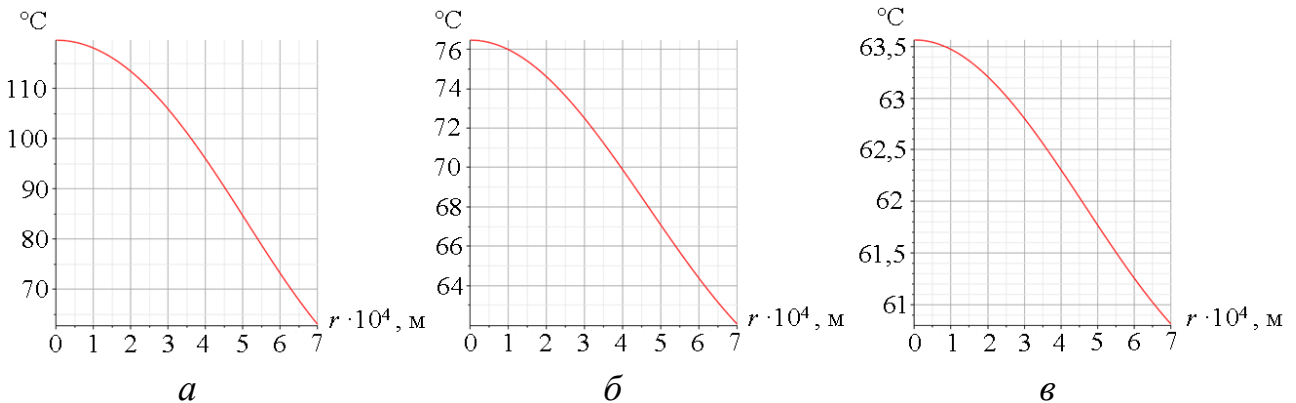


Рисунок 21 – Розподіл температури по радіусу гранули карбаміду діаметром 1,4 мм: *a* – через 0,8 с; *б* – через 3,5 с; *в* – через 6,85 с (кінець руху)

Аналіз розрахункових результатів показує, що температура гранул у нижній частині грануляційної башти дорівнює $60\text{--}62^\circ\text{C}$. Дана температура відповідає практично підтвердженій кінцевій температурі гранули, яка вимірювалась на експериментальному стенді.

Також теоретично обґрунтовано механізм міжфазного теплообміну і розмежування основних стадій теплоперенесення в системі «газ – тверда фаза» у зважених шарах. Для режиму «ідеального змішування» приймаємо припущення, що $\partial t(\Delta x, \tau) / \partial x = 0$. Тоді отримаємо вираз для визначення шару матеріалу, який перемішується у киплячому чи завислому шарах за час перебування його частинок τ_{np} :

$$t(\Delta \tau) = t(\tau) \exp \left[- \frac{\alpha 6(1 - \varepsilon)}{G_p c_m \rho_m d} \right] \tau_{np}; \quad (43)$$

або кінцевої температури матеріалу –

$$t_{TK} = t_{СП} + (t_{ТП} - t_{СП}) \exp \left[- \frac{\alpha 6(1 - \varepsilon)}{G_p c_m \rho_m d} \right] \tau_{np}. \quad (44)$$

Розрахунок кінцевої температури матеріалу, який охолоджується за рахунок руху потоку по похилим полицям у полицному апараті, проводять по комбінованій моделі «ідеальне витиснення (на поверхні полиці) – ідеальне перемішування (над розвантажувальним простором)» відповідно рівнянню:

$$t_{TK} = t_{СП} + (t_{ТП} - t_{СП}) \exp \left[- \left(\frac{l_{П}}{u_T} + \tau_{np} \right) \frac{\alpha 6(1 - \varepsilon)}{G_p c_m \rho_m d} \right]. \quad (45)$$

Вплив швидкості повітряного потоку на інтенсивність процесу міжфазного теплообміну представлено залежністю критерію Нуссельта від критерію Рейнольдса $Nu = f(Re)$ (рисунок 22), який враховує особливості процесу міжфазного теплообміну, що протікає окремо як на поверхні похилої полиці, так і в зоні розвантажувального простору.

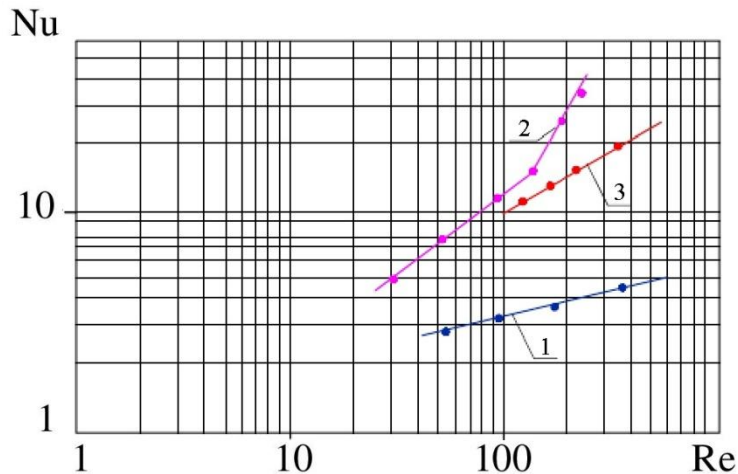


Рисунок 22 – Вплив швидкості газового потоку на інтенсивність міжфазного теплообміну: 1 – режим гравітаційно падаючого шару; 2 – режим зваженого шару; 3 – киплячий шар на горизонтальній решітці.

Матеріал – гранульований суперфосфат (витрата – $6 \text{ кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$)

Залежності, які представлено на рисунку 22, описуються наступними співвідношеннями:

для режиму «гравітаційно падаючого шару»:

на поверхні полиці –

$$Nu = 0,05 \cdot Re^{0,58}; \quad (46)$$

у зоні простору –

$$Nu = 1,2 \cdot Re^{0,32} \quad (Re < 173); \quad (47)$$

розвантажувальної щілини –

$$Nu = 0,013 \cdot Re^{1,23} \quad (Re > 173); \quad (48)$$

загалом всього шару –

$$Nu = 1,5 \cdot Re^{0,21}; \quad (49)$$

для режиму зваженого шару:

$$Nu = 0,05 \cdot Re^{0,62} \quad (Re < 173); \quad (50)$$

на поверхні полиці –

$$Nu = 10^{-5} \cdot Re^{2,39} \quad (Re > 173); \quad (51)$$

у зоні простору –

$$Nu = 0,38 \cdot Re^{0,73}; \quad (Re < 173); \quad (52)$$

розвантажувальної щілини –

$$Nu = 0,0045 \cdot Re^{1,73} \quad (Re > 173); \quad (53)$$

загалом всього шару –

$$Nu = 1,3 \cdot 10^{-4} \cdot Re^{2,14}. \quad (54)$$

Ефективність процесу охолодження гранульованих і зернистих матеріалів у полицному апараті досліджувалася шляхом установки в його робочому просторі похилої полиці з живим перетином від 5 % до 30 % при зміні величини відношення l/B в межах від $l/B = 1$ (апарат з вільним перетином типу пневмотруби) до $l/B = 0$ (апарат киплячого шару). Як видно з графіку (рисунок 23), величина коефіцієнта охолодження різко збільшується при зменшенні величини відношення l/B від 1 до 0,5, потім його зростання уповільнюється і при зменшенні величини відношення l/B від 0,5 до 0,3 залишається практично незмінною.

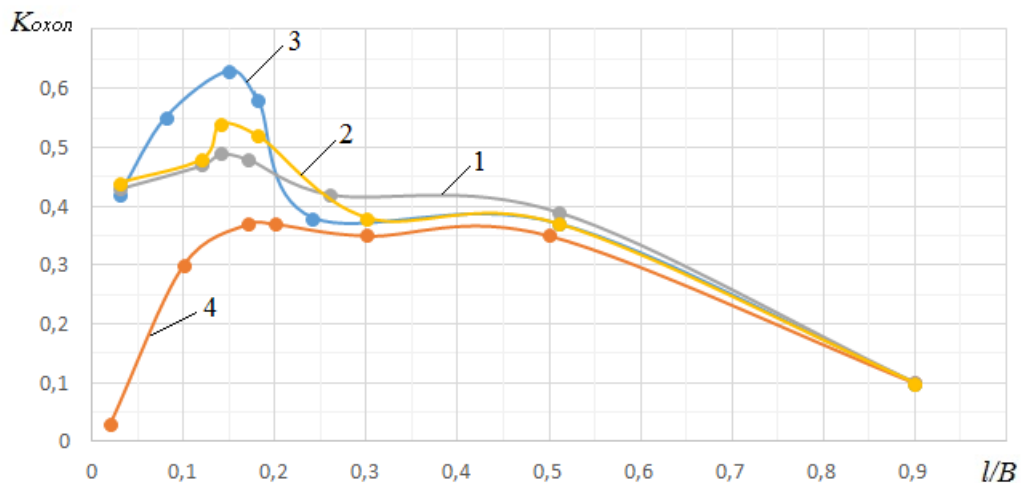


Рисунок 23 – Залежність ступеня охолодження від ширини розвантажувального простору: 1–4 – живий перетин полиці, 5 %, 10 %, 15 % і 30 % відповідно. Дослідний матеріал – полідисперсна суміш гранульованого суперфосфату. Матеріал – гранульований суперфосфат (полідисперсна суміш)

Встановлено, що найбільша ефективність процесу охолодження досягається при встановленні в робочому просторі апарата полицного контакту з живим перерізом 15 % і найменша – 30 %.

Шостий розділ присвячений термодинамічному та ексергетичному аналізу щодо ефективності грануляційного обладнання і апаратів конвективного охолодження гранул.

У загальному вигляді ексергетичний баланс має вигляд:

$$\sum E_{ex} = \sum E_{вих} + \sum E_{вт}, \quad (55)$$

де $\sum E_{ex}$ – сумарна ексергія, підведена до технічної системи із технологічними потоками, Дж; $\sum E_{вих}$ – сумарна ексергія, відведена від технічної системи з технологічними потоками, Дж; $\sum E_{вт}$ – сумарні втрати ексергії із технологічними потоками, Дж.

Ексергії технологічних потоків визначаються в залежності від їх агрегатного стану і дорівнюють:

для твердого та рідинного агрегатного стану –

$$E_{тв.р} = G \cdot c \cdot \left[(T - T_0) - T_0 \cdot \ln \frac{T}{T_0} \right]; \quad (56)$$

для газоподібного чи пароподібного агрегатного стану –

$$E_{г.п} = G \cdot [(i - i_0) - T_0 \cdot (s - s_0)], \quad (57)$$

де $E_{тв.р}$ – величина ексергії технологічного потоку, що знаходиться в твердому або рідкому агрегатному стані, Дж; $E_{г.п}$ – величина ексергії технологічного потоку, що знаходиться в газоподібному або пароподібному агрегатному стані, Дж; c – теплоємність речовини, Дж/(кг·К); T – абсолютна температура технологічного потоку за робочих умов, К; T_0 – абсолютна температура технологічного потоку в умовах навколишнього середовища, К; i , i_0 – відповідно ентальпія газу чи пари за певних умов, Дж/кг; s , s_0 – відповідно питома ентропія газу чи пари за певних умов, Дж/(кг·К).

Ексергетичний к.к.д., без урахування втрат від зміни величини тиску середовища зважаючи на його малість, дорівнює:

$$\eta_e = \frac{E_{вих}}{E_{ex}} = \frac{E_{ex} \cdot (E_T + E_0)}{E_{ex}} = \frac{T_0 \cdot \left(W_T \cdot \ln(T_{TK} / T_{TP}) + W_X \cdot \ln((T_{XK} / T_{XP})) + Q \cdot \left(1 - \frac{T_0}{T_{из}} \right) \right)}{Q \cdot \left(1 - \frac{T_0}{T_{TP}} \right)}. \quad (58)$$

Ексергетичний аналіз грануляційного обладнання здійснювався на прикладі гранулювання карбаміду продуктивністю за плавом 5000 кг/год. у грануляційних баштах, апаратах киплячого шару та багатоступневих

(поличних) апаратах. Аналіз показав відповідну тенденцію зміни ексергетичного к.к.д. від співвідношення кількості газового потоку до кількості твердої фази та дозволив оцінити енергетичні витрати на процес гранулювання.

Залежності коефіцієнта охолодження продукту від відношення водяного еквівалента охолоджуючого повітря (W_B) до водяного еквівалента продукту (W_m), які представлені на рисунку 24, показують достатню ефективність поличного апарата щодо охолодження продукту при питомих витратах охолоджуючого повітря (а, отже, і енергетичних витратах) у 1,5–2,0 рази менше питомих витрат та площі апаратів псевдозрідженого шару, які працюють за наближеними схемами повного витіснення та повного перемішування.

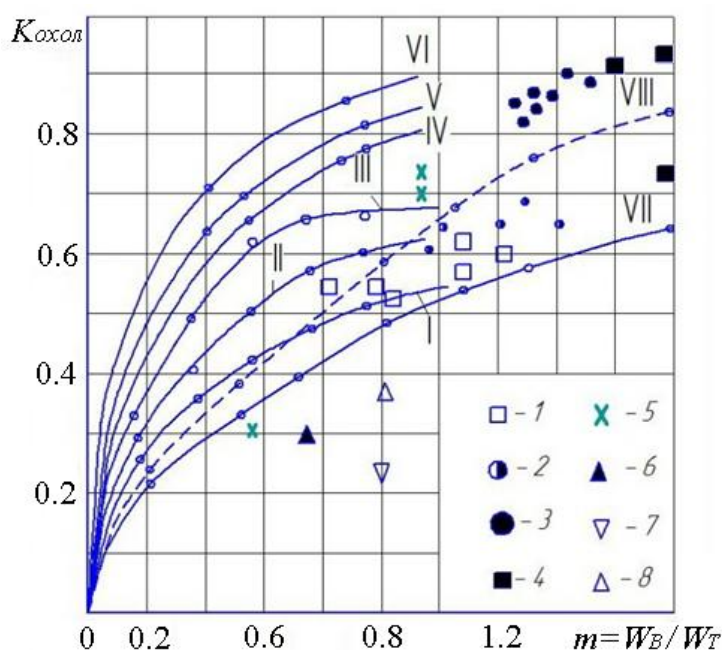


Рисунок 24 – Зіставлення експлуатаційних характеристик конвективних охолоджувачів: *Поличний охолоджувач*: I – довжина полиці становить 50 % довжини перерізу апарата; II – довжина полиці становить 70 % довжини перерізу апарата; III – довжина полиці становить 85 % довжини перерізу апарата; IV – охолоджувач має дві полиці; V – охолоджувач має три полиці; VI – охолоджувач має чотири полиці. *Охолоджувачі псевдозрідженого шару, які працюють за схемою*: VII – схема повного перемішування; VIII – схема повного витіснення. *Охолоджувач псевдозрідженого шару*: 1, 5 – одноступінчастий прямокутний; 2 – одноступінчастий циліндричний; 3, 4 – двоступінчастий. *Барабанний обертовий охолоджувач*: 6 – одноходовий; 7 – секційний; 8 – двостінний

За продуктивності до 20–25 т/год. доцільно використовувати охолоджувачі поличного типу і одноступінчасті охолоджувачі киплячого шару, які при достатній ефективності ($K_{охол}=0,5-0,8$) мають більш низькі енергетичні витрати. За продуктивності більше 25–30 т/год. необхідно використовувати дво- і триступінчасті охолоджувачі киплячого шару з безліччю фонтанів та з колосниковою решіткою. Незважаючи на значні габарити та енергетичні витрати, дані охолоджувачі забезпечують високу ефективність охолодження ($K_{охол}=0,8-0,99$).

ВИСНОВКИ

1. Проаналізовано сучасні методи гранулювання та апаратура для їх здійснення. Визначено, що найбільшого впровадження набули наступні методи: диспергування плавів та послідовне охолодження утворених гранул у грануляційних баштах (приллювання); обкочування з одночасним диспергуванням плаву на поверхню гранул; диспергування пульпи чи суспензії у псевдозріджений (зважений) шар. Також, внаслідок аналізу витікає, що для отримання багатошарових та пористих гранул найбільш раціональною технологією є метод розпилення рідинного середовища на поверхню частинок у киплячому чи завислому шарі.

2. Теоретично обґрунтовано гідродинаміку руху диспергованих крапель плаву під впливом власних коливань, що дало змогу розраховувати факел розпилу, раціонально підібрати форму корзини гранулятора та швидкість її обертання. Встановлено, що збільшення швидкості обертання корзини на 70 об./хв. призводить до значного (майже вдвічі) збільшення радіуса факела розпилу. Це, у свою чергу, дозволяє спрогнозувати необхідний діаметр грануляційної башти.

3. Теоретично досліджено кінетику охолодження гранул при їх падінні у грануляційній башті. Це дало змогу побудувати епюри розподілу температури по радіусу гранули карбаміду діаметром 1,4 мм, що дозволяє детально вивчити процеси теплопередачі всередині гранул під час їх охолодження. Також було отримано рівняння теплового балансу, яке дозволяє визначити температуру повітря, що контактує з поверхнею гранули.

4. Доведена можливість отримання укрупнених гранул карбаміду розміром 7–10 мм при високотемпературному гранулюванні методом обкочування в тарілчастому грануляторі. Визначено оптимальні діапазони показників конструктивних та режимно-технологічних параметрів процесу, а саме: кут нахилу тарілки становить 45° , температура плаву при його розпиленні складає $134\text{--}140^\circ\text{C}$, оптимальний факел розпилення для гідравлічної форсунки становить $\beta = 65^\circ$ при тиску в ємності $0,07\text{--}0,09$ МПа. Також встановлено, що розпилення плаву треба здійснювати у лівому секторі верхньої частини тарілки, що обумовлює більший вміст товарної фракції у готовому продукті.

5. Отримано емпіричні рівняння для визначення швидкості газового потоку, за якої реалізовується гідродинамічний режим завислого шару. Теоретично обґрунтовано вплив газового потоку на процес сепарації дрібних частинок. Розроблено математичну модель сепарації твердих частинок зі зваженого шару та отримано залежність, яка дозволяє визначити величину виносу частинок матеріалу окремо за кожною фракцією, що дає можливість прогнозувати гранулометричний склад кінцевого продукту.

6. Теоретично проаналізовано вплив пористої структури оболонки гранули на характер теплопровідності, що дає змогу визначити температурний режим процесу при отриманні гранул з різним ступенем пористості. Отримано залежність для визначення ефективного коефіцієнта теплопровідності в залежності від величини пористості гранули та істинних коефіцієнтів

теплопровідності твердого скелета і газу в порожнинах гранули. Встановлено, що з підвищенням пористості збільшується час нагрівання і знижується температура гранул.

7. Теоретично обґрунтовано розмежування основних стадій теплоперенесення в системі «газ – тверда фаза» у зважених шарах. Запропоновано критерій (температурний симплекс) для вибору розрахункових методик, які застосовуються для вирішення внутрішніх або зовнішніх задач теплоперенесення, що дозволяє точніше моделювати процеси теплопередачі в залежності від конкретних умов. На основі рішення диференціального рівняння теплопровідності Фур'є (внутрішня задача) та диференціального рівняння теплового балансу (зовнішня задача) розроблено математичну модель міжфазного теплообміну в гетерогенній системі «газ – тверда фаза», що дало змогу оцінити ефективність теплоперенесення у гравітаційно падаючому, киплячому та зваженому шарах.

8. Отримано результати дослідження гідродинаміки руху газового потоку в багатоступеневому поличному апараті зваженого шару. Експериментально встановлено, що при $l/B = 0,15$ та живому перетині полиці 15 % спостерігається значне збільшення швидкості газового потоку в зоні розвантажувального простору, що позитивно впливає на здійснення тепло- та масообмінних процесів. Розроблено математичну модель кінетики гранулювання у багатоступеневих поличних апаратах, яка дозволяє визначити розподіл частинок за їх розмірами на кожній полиці гранулятора.

9. Проведено ексергетичний аналіз для раціонального вибору конструкції охолоджувача гранул мінеральних добрив, що дозволило оцінити ефективність охолоджувачів різного типу. Показано, що найбільш розповсюджені у промисловості охолоджувачі киплячого шару мають достатню величину термодинамічного к.к.д. та ефективність охолодження, але низький ексергетичний к.к.д. та, відповідно, високі енергетичні витрати. Найбільший ексергетичний к.к.д. (в межах 0,4–0,75) мають поличні охолоджувачі, у яких ефективність охолодження також достатньо висока і досягає 0,5–0,85 за низьких енерговитрат.

10. Розроблено методику ексергетичного аналізу щодо оцінки енергетичних витрат на процеси гранулювання та конвективного охолодження гранульованого продукту, яка дозволяє обґрунтувати вибір оптимальних параметрів зазначених процесів, враховуючи енергетичні витрати та ефективність обладнання. Надано рекомендації щодо практичного використання охолоджувачів гранульованих добрив та зернистих сумішей у різних галузях промисловості, які допоможуть оптимізувати процеси охолодження, зменшити енергетичні витрати та підвищити ефективність виробництва в окремих секторах промисловості.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Наукові праці, в яких опубліковані основні наукові результати дисертації

Монографії та розділи в монографіях

1. Юхименко М. П., Острога Р. О., Боцко Й. Конвективне охолодження гранульованих та зернистих матеріалів : монографія. Суми : Університетська книга, 2021. 152 с.

Здобувач провів аналіз існуючої інформації щодо перспективних конструкцій конвективних охолоджувачів гранульованих мінеральних добрив, виконав аналіз процесу охолодження гранул мінеральних добрив у поличному охолоджувачі, розглянув вплив дисперсійного газового середовища на механізми зважування твердих частинок та їх сепарацію в активних гідродинамічних умовах, а також виконав ексергетичний аналіз для раціонального вибору конструкції охолоджувача гранул мінеральних добрив.

2. Artyukhov A., Krmela J., Artyukhova N., Ostroha R. Modeling of the Aerodisperse Systems Hydrodynamics in Devices With Directional Motion of the Fluidized Bed. *Encyclopedia of Information Science and Technology, Fifth Edition* : collective monograph. USA : IGI Global, 2020. P. 1289–1307. (**Scopus**).

Здобувач виконав моделювання гідродинамічних параметрів та структури матеріальних потоків неоднорідних систем із використанням програмного забезпечення Ansys CFX.

Статті у фахових наукових виданнях із переліку МОН України

3. Острога Р. О. , Юхименко М. П. , Вакал В. С. , Михайловський Я. Е. Капсульовані органо-мінеральні добрива пролонгованої дії. Процес одержання. *Хімічна промисловість України*. Київ : Союз хіміків України, 2015. № 1 (126). С. 40–44.

Здобувач розробив експериментальний стенд із використанням сучасних засобів автоматизації та отримав результати досліджень щодо оптимізації процесу капсулювання гранул в апараті псевдозрідженого шару.

4. Yukhymenko M., Ostroha R., Litvinenko A., Piddubnyi Y., Zabitsky D. Research of Operating Mode of Rhombic Gravitational Pneumatic Classifier. *Technology Audit and Production Reserves*. Kharkiv : PC Technology Center, 2019. Vol. 2, № 3 (46). P. 4–6.

Здобувачеві належить інформація щодо результатів дослідження процесу розділення полідисперсної суміші гранул на окремі фракції.

5. Al-Khyatt M. Nadhem, Skydanenko M., Ostroha R., Neshta A., Yukhymenko M., Yakhnenko S., Zabitsky D., Yesypchuk S., Moskalchuk O. Research of Plate Granulator Operation Modes in the Production of Coarse Carbamide Granules. *Technology Audit and Production Reserves*. Kharkiv : PC Technology Center, 2022. Vol. 1, № 3 (63). P. 6–9.

Здобувач дослідив вплив конструктивних та режимно-технологічних параметрів на процес отримання укрупнених гранул карбаміду в тарілчастому грануляторі, а також провів оптимізацію процесу диспергування плаву на шар відносно площини тарілки.

6. Михайловський Я. Е., Юхименко М. П., Острога Р. О. Охолоджувальна кристалізація персульфату амонію в кристалізаторі з псевдозрідженим шаром. *Вісник Черкаського державного технологічного університету*. Черкаси, 2023. № 2. С. 111–118.

Здобувач провів дослідження та виявив основні фактори, що впливають на процес кристалізації персульфату амонію у псевдозрідженому шарі, розробив методику розрахунку охолоджувального класифікуючого кристалізатора.

7. Al-Khyatt M. Nadhem, Sklabinsky V., Ostroha R., Skydanenko M., Yukhymenko M., Bocko J., Ostroha D., Zabitsky D., Moskalchuk O., Serhiienko A. Study of Temperature Changes in Mineral Fertilizer Granules After Contact With Air in a Granulation Tower. *Technology Audit and Production Reserves*. Kharkiv : PC Technology Center, 2023. Vol. 4, № 3 (72). P. 6–9.

Здобувач отримав розрахункові рівняння для визначення температури повітря, яке контактує з поверхнею гранули при її падінні у грануляційній баїті та температурного профілю всередині гранули.

Статті у наукових періодичних виданнях інших держав та виданнях, які індексуються наукометричними базами даних Scopus та Web of Science

8. Yukhymenko M., Ostroha R., Artyukhov A. Hydrodynamic and Kinetic Processes of the Mineral Fertilizer Granules Encapsulating in the Multistage Device With Suspended Layer. *Eastern-European Journal of Enterprise Technology*, 2016. № 6/6 (84). P. 22–28. **(Scopus, Q3)**.

Здобувач дослідив конструкції поличних пристроїв та встановив їх вплив на процеси укрупнення і унесення гранул, а також розробив математичну модель кінетики гранулювання в поличному багатоступеневому апараті, яка враховує зміну щільності розподілу гранул за розмірами на кожному ступені гранулювання.

9. Ostroha R., Yukhymenko M., Yakushko S., Artyukhov A. Investigation of the Kinetic Laws Affecting the Organic Suspension Granulation in the Fluidized Bed. *Eastern-European Journal of Enterprise Technology*, 2017. № 4/1 (88). P. 4–10. **(Scopus, Q3)**.

Здобувач експериментально визначив температурні режими процесу гранулювання курячого посліду, встановив робочий температурний режим, розробив апаратне оформлення лінії виробництва гранульованих органічних добрив.

10. Ostroha R., Yukhymenko M., Lytvynenko A., Bocko J., Pavlenko I. Granulation Process of the Organic Suspension: Fluidized Bed Temperature Influence on the Kinetics of the Granule Formation. *Lecture Notes in Mechanical Engineering*, 2019. Part F2. P. 463–471. **(Scopus, WoS, Q3)**.

Здобувачеві належать результати експериментальних досліджень впливу температурного режиму на формування певної структури гранули, отримано аналітичні залежності для визначення часу та температури прогрівання гранул, які дозволяють прогнозувати енергетичні та економічні показники виробництва добрив та оптимізувати процес.

11. Lytvynenko A., Yukhymenko M., Pavlenko I., Pitel J., Mizakova J., Lytvynenko O., Ostroha R., Bocko J. Ensuring the Reliability of Pneumatic Classification Process for Granular Material in a Rhomb-Shaped Apparatus. *Applied Sciences*, 2019. 9 (8). 1604. **(Scopus, WoS, Q1)**.

Здобувач провів аналіз існуючої інформації щодо моделей процесу пневматичної класифікації сипких полідисперсних сумішей, підготував програмне забезпечення чисельних розрахунків для реалізації процедури регресії та проаналізував отримані результати.

12. Yukhymenko M., Ostroha R., Lytvynenko A., Mikhajlovskiy Y., Bocko J. Cooling Process Intensification for Granular Mineral Fertilizers in a Multistage Fluidized Bed Device. *Lecture Notes in Mechanical Engineering*, 2020. 2. P. 249–257. **(Scopus, WoS, Q4)**.

Здобувач виконав аналіз експериментальних досліджень впливу конструктивних параметрів поличних контактних елементів на процес охолодження гранул мінеральних добрив у поличному охолоджувачі.

13. Yukhymenko M., Artyukhov A., Ostroha R., Artyukhova N., Krmela J., Bocko J. Multistage Shelf Devices with Fluidized Bed for Heat-Mass Transfer Processes: Experimental Studies and Practical Implementation. *Applied Sciences*, 2021. 11 (3). 1159. **(Scopus, WoS, Q2)**.

Здобувач проаналізував результати експериментальних досліджень щодо гідродинаміки руху двофазного потоку в поличному апараті зваженого шару та надав практичні рекомендації.

14. Ostroha R., Yukhymenko M., Bocko J., Artyukhov A., Krmela J. Determining the Main Regularities in the Process of Mineral Fertilizer Granule Encapsulation in the Fluidized Bed Apparatus. *Eastern-European Journal of Enterprise Technology*, 2021. № 4/6 (112). P. 23–32. **(Scopus, Q2)**.

Здобувач розробив математичну модель дорощування (капсулювання) гранул, аналітичним способом отримав графічні залежності, які показали зростання товщини твердої оболонки від збільшення питомої витрати суспензії, діаметра частинок ретурну та часу процесу капсулювання.

15. Sklabinskyi V., Liaposhchenko O., Pitel J., Pavlenko I., Skydanenko M., Ostroha R., Yukhymenko M., Simeiko K., Demianenko M., Volf M., Starynskyi O., Yurchenko O., Mandryka O. Experimental Studies and Condition Monitoring of Auxiliary Processes in the Production of Al_2O_3 by Sol–Gel Technology. *Processes*, 2022. 10. 2090. **(Scopus, WoS, Q2)**.

Здобувач розробив методологію формування гранул та провів аналіз отриманих результатів.

16. Yukhymenko M., Ostroha R., Bocko J. Design of a Shelf Pneumatic Classifier for Separating a Polydisperse Mixture of Granulated Superphosphate. *Eastern-European Journal of Enterprise Technology*, 2022. № 6/1 (120). P. 33–42. **(Scopus, Q3)**.

Здобувач розробив математичну модель сепарації дрібних фракцій з полідисперсної суміші гранульованих добрив, шляхом обробки експериментальних даних отримав емпіричне рівняння, яке дозволяє визначати концентрацію частинок у газовому потоці окремих фракцій матеріалу.

17. Yurchenko O., Ostroha R., Sklabinskyi V., Gusak O., Bocko J. Formation of Liquid Droplets at the Prilling Bucket Outlet Under Free Oscillations of the Liquid Jet. *Lecture Notes in Mechanical Engineering*, 2023. 2. P. 177–185. (Scopus, WoS, Q4).

Здобувач провів аналіз теоретичних досліджень щодо використання обертових вібраційних грануляторів, отримав рівняння руху рідини у стаціонарному режимі в циліндричній системі координат, які лежать в основі теоретичного опису руху рідини у струмені.

18. Sklabinskyi V., Pitel J., Skydanenko M., Simeiko K., Liaposhchenko O., Pavlenko I., Ostroha R., Yukhymenko M., Mandryka O., Storozhenko V. Pyrocarbon Coating on Granular Al₂O₃ for HTGR-Type Power Reactor. *Coatings*, 2023. 13. 1462. (Scopus, WoS, Q2).

Здобувач проаналізував та обґрунтував отримані експериментальні дані щодо формування полікарбонатового покриття на гранулах оксиду алюмінію.

Наукові праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації

19. Капсулювання гранул мінеральних добрив органічною речовиною / Є. М. Однодворець, Р. О. Острога. *Освіта, наука та виробництво: розвиток та перспективи : матеріали I науково-методичної конференції*, м. Шостка, 28 квітня 2015 р. Суми : СумДУ, 2015. С. 54.

20. Застосування добрив на органічній основі для вирощування екологічно чистих продуктів / А. О. Ільченко, Р. О. Острога. *Сучасні технології у промисловому виробництві : матеріали науково-технічної конференції викладачів, співробітників, аспірантів і студ. фак-ту технічних систем та енергоефективних технологій*, м. Суми, 14–17 квітня 2015 р. Суми : СумДУ, 2015. Ч. 2. С. 125.

21. Кінетика гранулювання органічних суспензій / С. П. Шевець, Р. О. Острога. *Сучасні технології у промисловому виробництві : матеріали та програма IV Всеукраїнської міжвузівської науково-технічної конференції*, м. Суми, 19–22 квітня 2016 р. Суми : СумДУ, 2016. Ч. 2. С. 88.

22. Енергозберігаючі та екологічно безпечні технології виробництва гранульованих мінеральних добрив пролонгованої дії / О. А. Темідайо, Р. О. Острога. *Освіта, наука та виробництво: розвиток і перспективи : I Всеукраїнська науково-методична конференція*, м. Шостка, 21 квітня 2016 р. Суми : СумДУ, 2016. С. 128.

23. The Mineral Fertilizer Granules Encapsulating in a Multistage Shelf Apparatus / С. П. Шевець, Р. О. Острога. *Хімічна технологія: наука, економіка та виробництво : III Міжнародна науково-практична конференція*, м. Шостка, 23–25 листопада 2016 р. Суми : СумДУ, 2016. С. 77.

24. Drying and Granulation of Organic Substances in the Apparatus with Active Flow Hydrodynamics / С. П. Шевець, Р. О. Острога. *Chemistry and Chemical Technology : VI International Youth Science Forum "Litteris et Artibus"*, Lviv, November 24–26, 2016. Lviv : Lviv Polytechnic Publishing House, 2016. P. 414–415.

25. Investigation of Mechanics of the Solid Phase Motion in the Gas Flow of the Fluid Bed Apparatus / Н. Р. Артюхова, Р. О. Острога. *Chemical Technology and Engineering : International Scientific Conference*, Lviv, June 26–30, 2017. Lviv : Lviv Polytechnic Publishing House, 2017. P. 351–352.

26. Кінетика гранулювання органічних суспензій в апаратах з активною гідродинамікою потоків / С. П. Шевець, Р. О. Острога. *Сучасні технології у промисловому виробництві : матеріали науково-технічної конференції викладачів, співробітників, аспірантів і студ. фак-ту технічних систем та енергоефективних технологій*, м. Суми, 18–21 квітня 2017 р. Суми : СумДУ, 2017. Ч. 2. С. 103.

27. Апаратурне оформлення процесу капсулювання гранульованих мінеральних добрив / Н. Р. Артюхова, Р. О. Острога. *Сучасні технології у промисловому виробництві : матеріали науково-технічної конференції викладачів, співробітників, аспірантів і студ. фак-ту технічних систем та енергоефективних технологій*, м. Суми, 18–21 квітня 2017 р. Суми : СумДУ, 2017. Ч. 2. С. 104.

28. Development and Engineering Foundation of the Encapsulated Organic-Mineral Fertilizers / Н. Р. Артюхова, Р. О. Острога. *Praktyczne Aspekty Inżynierii Chemicznej : Seminarium*, Poznan, June 23, 2017. Poznan : Politechnika Poznanska, 2017. P. 121–123.

29. Final Drying of the Porous Ammonium Nitrate in the Shelf Dryers: Impact of the Granules Flow Constraint Degree on the Nanoporous Structure Quality / N. Artyukhova, R. Ostroha, M. Yukhymenko, J. Krmela, V. Krmelova. *Proceedings of the 2019 IEEE 9th International Conference on Nanomaterials : Applications and Properties, NAP 2019*. 9075665. – [Електронний ресурс]. – Режим доступу : <https://nap.sumdu.edu.ua/index.php/nap/nap2019/paper/view/2914> (**Scopus**).

30. Моделювання процесів при гранулоутворенні за золь-гельною технологією / О. О. Ляпощенко, І. В. Павленко, М. С. Скиданенко, М. М. Дем'яненко, М. П. Юхименко, Р. О. Острога, М. П. Кононенко, В. М. Покотило. *Сучасні технології у промисловому виробництві : матеріали та програма VIII Всеукраїнської науково-технічної конференції*, м. Суми, 20–23 квітня 2021 р. Суми : СумДУ, 2021. С. 209.

31. Вплив технологічних параметрів процесу на характеристики продукту, отриманого за золь-гельною технологією / О. О. Ляпощенко, І. В. Павленко, М. С. Скиданенко, М. М. Дем'яненко, М. П. Юхименко, Р. О. Острога, С. М. Яхненко, М. П. Кононенко. *Сучасні технології у промисловому виробництві : матеріали та програма VIII Всеукраїнської науково-технічної конференції*, м. Суми, 20–23 квітня 2021 р. Суми : СумДУ, 2021. С. 218.

32. Theoretical Regularities of Nitrogen Fertilizer Granulation Process in Plate Granulator / Nadhem M. Al-Khyatt, M. Skydanenko, S. Yesypchuk, O. Moskalchuk. *Innovations and prospects of world science : VI International scientific and practical conference*, Vancouver (Canada), February 2–4, 2022. Vancouver : Perfect Publishing, 2022. P. 165–167.

Наукові праці, що додатково відображають наукові результати дисертації

33. Якушко С. І., Острога Р. О., Боцко Й. Біодобрива та біопаливо. Переваги внутрішньогосподарської утилізації сільськогосподарських відходів : монографія. Суми : Видавництво «Ярославна», 2018. 265 с.

Здобувач провів аналіз економічної доцільності виробництва натуральних добрив для вирошування екологічно безпечної сільськогосподарської продукції, палива та енергоносіїв для власного господарства, розглянув технології виробництва гранульованих органічних та органо-мінеральних добрив, а також виявив переваги внутрішньогосподарської утилізації сільськогосподарських відходів.

34. Artyukhov A., Artyukhova N., Ostroha R., Yukhymenko M., Krmela J., Bocko J. Convective Drying in the Multistage Shelf Dryers: Theoretical Bases and Practical Implementation. *Current Drying Processes* : collective monograph. United Kingdom : IntechOpen, 2020. P. 41–61.

Здобувач обґрунтував особливості гідродинамічної структури двофазного потоку в поличному апараті зваженого шару та надав практичні рекомендації.

35. Ostroha R., Yukhymenko M., Bocko J. Technology of Obtaining Organic Granular Fertilizers: Study of Dehydration Process in Fluidized Bed : monograph. Latvia, Riga : LAP LAMBERT Academic Publishing, 2018. 52 p.

Здобувачеві належать результати експериментальних та теоретичних досліджень щодо процесів формування гранул в апараті псевдозрідженого шару та багатоступеневому апараті зваженого шару.

36. Ostroha R., Yukhymenko M., Mikhajlovskiy Y., Litvinenko A. Technology of Producing Granular Fertilizers on the Organic Basis. *Eastern-European Journal of Enterprise Technology*, 2016. № 1/6 (79). P. 19–26. (**Scopus, Q3**).

Здобувач запропонував технологію отримання гранульованих добрив на органічній основі та розробив схему промислової лінії для їх виробництва.

37. Ostroha R., Yukhymenko M., Lytvynenko O., Lytvynenko A. Production of Encapsulated Organo-Mineral Fertilizers in a Fluidized Bed Granulator. *Acta Mechanica Slovaca*, 2020. 24 (2). P. 50–55.

Здобувач запропонував технологію отримання капсульованих добрив пролонгованої дії та отримав аналітичну залежність для визначення середньозваженого діаметра частинок протягом процесу капсулювання.

38. Yukhymenko M., Ostroha R., Artyukhov A., Bocko J. Effect of Temperature on Formation of Nanoporous Structure of Granule Shell in Technology of Obtaining Organo-Mineral Fertilizers. *Springer Proceedings in Physics*, 2020. 247. P. 159–169. (**Scopus**).

Здобувач розробив алгоритм розрахунків температурного профілю за допомогою диференційного рівняння Фур'є при граничних умовах 3-го роду шляхом отримання регресійних рівнянь для визначення сталих коефіцієнтів.

39. Lytvynenko A., Pavlenko I., Yukhymenko M., Ostroha R., Pitel J. Hydrodynamics of Two-Phase Upflow in a Pneumatic Classifier with the Variable

Cross-Section. *Lecture Notes in Mechanical Engineering*, 2020. 2. P. 216–227. (Scopus, WoS, Q4).

Здобувач проаналізував конструктивні особливості пневматичних класифікаторів для розділення сипких полідисперсних сумішей на фракції.

40. Yukhymenko M., Ostroha R., Evtuhov A. Pneumatic Classification of Granular Materials in Rhomb-Shaped Apparatus. *Acta Mechanica Slovaca*, 2021. 25 (3). P. 46–51.

Здобувач обґрунтував механізм процесу розділення сипких полідисперсних сумішей на фракції у гравітаційному класифікаторі.

41. Yurchenko O., Sklabinskyi V., Ochowiak M., Ostroha R., Gusak O. Rational Choice of a Basket for the Rotational Vibropriller. *Journal of Engineering Sciences*, 2022. Vol. 9 (1). P. F16–F20.

Здобувач визначив вплив режимно-технологічних та конструктивних параметрів обертового вібраційного гранулятора на процес гранулоутворення у грануляційних баштах.

42. Ostroha R., Yukhymenko M., Mandryka O. Hydraulic Regularities of Fluidized Bed During Encapsulation of Organo-Mineral Fertilizers. *Acta Mechanica Slovaca*, 2023. 27 (2). P. 12–17.

Здобувач обґрунтував важливість гідравлічних характеристик киплячого шару та дослідив їх вплив на енергетичні витрати процесу гранулювання.

АНОТАЦІЯ

Острога Р. О. Теоретичні основи процесів формування гранул у неоднорідному середовищі. – На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.17.08 – процеси та обладнання хімічної технології. Суми, Сумський державний університет, 2024. Спеціалізована вчена рада Д 55.051.04.

Дисертаційна робота присвячена розв'язанню наукової проблеми, пов'язаної із розробленням наукових засад формування гранул у неоднорідному середовищі.

Створено науково-теоретичні основи для визначення температурного профілю у двошаровій гранулі, що дозволяє враховувати складні взаємодії між шарами гранули, теплопередачу, а також фізико-хімічні властивості використовуваних речовин. Теоретично проаналізовано вплив пористої структури оболонки на характер теплопровідності, включаючи комплексний аналіз взаємозв'язку між морфологією пор та ефективністю теплопередачі у шарі матеріалу.

Створено науково-теоретичні основи формування гранул у багатоступеневих апаратах зваженого шару, що відкриває нові можливості для оптимізації процесів гранулоутворення у складних гетерогенних системах та сприяє підвищенню ефективності та якості виробництва гранульованих продуктів у різних галузях промисловості. Визначено конструктивно-технологічні параметри робочої камери поличного гранулятора зі зваженим шаром, що дозволяє реалізувати активний струменевий гідродинамічний режим зважування. Такий підхід сприяє покращенню ефективності технологічних процесів у промислових умовах і може мати значний вплив на підвищення конкурентоспроможності підприємств, які займаються виробництвом гранульованих продуктів.

Удосконалено методологічну основу теоретичного розрахунку розпаду струменів та теоретичного визначення розміру крапель рідини під впливом власних коливань у струмені рідини, а також методологічну основу теоретичного аналізу температурного профілю гранул мінеральних добрив уздовж радіуса цієї гранули до її центру, що дозволяє визначати динаміку зміни температури гранули при її конвективному охолодженні у грануляційній башті.

Розроблено методики термодинамічного та ексергетичного аналізів раціонального вибору певних типів охолоджувачів гранульованих мінеральних добрив. Проведено ексергетичний аналіз для раціонального вибору конструкції охолоджувача гранул мінеральних добрив, що дозволяє систематично оцінити ефективність різних конструкцій охолоджувачів з точки зору енергетичних втрат та ефективності використання енергії.

Практична значущість роботи підтверджена практичними рекомендаціями впровадження у виробництво малогабаритної мобільної установки для капсулювання мінеральних добрив на базі Товариства з обмеженою відповідальністю «Альянс», а також виконаними напрацюваннями дослідних зразків гранульованих добрив на органічній основі для Товариства з

обмеженою відповідальністю «Білопілля Агросвіт» та напрацюванням дослідних зразків складнозмішаних (комбінованих) добрив спеціального призначення для Товариства з обмеженою відповідальністю «Аграрник».

Ключові слова: гранулятор, приливання, обкочування, активна гідродинаміка, гранулоутворення, енергоефективність, температурний профіль, міжфазний теплообмін, охолоджувач, пористість, ексергетичний аналіз.

ABSTRACT

Ostroha R. O. Theoretical Foundations of Granule Formation Processes in a Heterogeneous Environment. – Manuscript.

Thesis for the Degree of Doctor of Technical Sciences in Specialty 05.17.08 – Processes and Equipment of Chemical Technology, Sumy, Sumy State University, 2024. Specialized Academic Council D 55.051.04.

The thesis addresses the scientific problem of developing the theoretical foundations for granule formation in heterogeneous environments.

Scientific-theoretical foundations have been established for determining the temperature profile in a double-layer granule, allowing for the consideration of complex interactions between granule layers, heat transfer, and the physicochemical properties of the materials used. The influence of the shell porous structure on the nature of thermal conductivity has been theoretically analyzed, including a comprehensive analysis of the relationship between pore morphology and heat transfer efficiency in the material layer.

Scientific-theoretical foundations for granule formation in multistage fluidized bed apparatuses have been established, opening new possibilities for optimizing granulation processes in complex heterogeneous systems and improving the efficiency and quality of granulated product production in various industries. The design and technological parameters of the working chamber of a tray granulator with a fluidized bed have been determined and are eligible for the implementation of an active jet hydrodynamic fluidization regime. This approach enhances the efficiency of technological processes in industrial conditions and can significantly improve the competitiveness of enterprises engaged in the production of granulated products.

The methodological basis for the theoretical calculation of jet breakup and theoretical determination of droplet size under the influence of intrinsic oscillations in the liquid jet has been improved. As well as the methodological basis for the theoretical analysis of the temperature profile of mineral fertilizer granules along the radius to the center of the granule has been enhanced, enabling the determination of temperature dynamics during convective cooling in the granulation tower.

A methodology for thermodynamic and exergy analyses of the rational choice of certain types of coolers for granulated mineral fertilizers has also been developed. An exergy analysis has been conducted for the rational selection of mineral fertilizer granule cooler designs and are allowing for a systematic assessment of the efficiency of different cooler designs in terms of energy losses and energy use efficiency.

The practical significance of the work is confirmed by practical recommendations for the implementation of a small-sized mobile unit for encapsulating mineral fertilizers based on «Alliance» LLC, as well as the development of experimental samples of organic-based granular fertilizers for «Bilopillya Agrosvit» LLC and the development of experimental samples of complex mixed (combined) fertilizers for special purposes for «Ahrarnik» LLC.

Keywords: granulator, prilling, rolling, active hydrodynamics, granule formation, energy efficiency, temperature profile, interphase heat exchange, cooler, porosity, exergy analysis.

Формат 60×90/16. Ум. друк. арк. 2,3. Обл.-вид. арк. 1,9.
Тираж 100 пр. Зам. № 336.

Видавець і виготовлювач
Сумський державний університет,
вул. Харківська, 116, м. Суми, 40007
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи ДК № 3062 від 17.12.2007.