

УДК 66.099

КП

№ держреєстрації 0116U006812

Інв. N

Міністерство освіти і науки України
Сумський державний університет
40007, м. Суми, вул. Р-Корсакова, буд. 2;
тел. (0542) 33-41-08/33-40-49

ЗАТВЕРДЖУЮ

проректор з наукової роботи

д.ф.-м.н., професор

А.М. Черноус

ЗВІТ

ПРО НАУКОВО-ДОСЛІДНУ РОБОТУ

Підвищення ефективності грануляторів і сушарок з активними гідродинамічними режимами
для отримання, модифікації і капсулювання добрив

РОЗРОБКА ТА СТВОРЕННЯ ДОСЛІДНОГО УСТАТКУВАННЯ ВУЗЛА ГРАНУЛЮВАННЯ З
ВІБРАЦІЙНИМ ВПЛИВОМ НА СТРУМІНЬ РОЗПЛАВУ, ПРОВЕДЕННЯ ВИПРОБУВАНЬ
(проміжний)

Начальник НДЧ

к.ф.-м.н., с.н.с.

Д.І. Курбатов

Керівник НДР

к.т.н., доцент

А.Є. Артюхов

2016

Рукопис закінчено 26 грудня 2016 р.

Результати цієї роботи розглянуті науковою радою,
протокол від 2016.11.24 №3

СПИСОК АВТОРІВ

Керівник НДР

к.т.н., доцент

А. Артюхов

(розд. 1, висновки)

Відповідальний виконавець

інженер

А. Іванія

(вступ)

Старший науковий співробітник

к.т.н.

Н. Артюхова

(розд. 2)

Старший науковий співробітник

к.т.н.

Р. Острога

(реферат)

РЕФЕРАТ

Звіт про НДР: 47 с., 33 рис., 2 табл., 29 джерел.

Об`єкт дослідження – процеси отримання добрив та гранул з особливими властивостями в грануляційних пристроях вібраційного та вихрового типу, у тому числі багатоступеневих.

Мета роботи – дослідження впливу гідро- та термодинамічних показників здійснення процесу гранулювання на якість гранульованої продукції.

Методи дослідження. В основу фізичного моделювання покладено методи теорії подібності. Експериментальні дослідження проведено з метою перевірки адекватності запропонованої математичної моделі. Адекватність отриманих розрахункових залежностей обумовлена застосуванням математичних моделей, що базуються на загальних положеннях гідрогазодинаміки та кінетики, а також зіставленням розрахункових та експериментальних даних.

Здійснено теоретичний опис процесу формування краплі у зустрічному вихровому газовому потоці, у т.ч. при накладанні на струмінь рідини вібрації. Проведено серію експериментальних досліджень механізму пошарової кристалізації гранул у вихровому газовому потоці. Проведено теоретичний опис кінетики прогріву гранули та видалення з неї вологи, експериментально визначено вплив гідродинамічних показників руху газового потоку на термодинамічні показники робочого простору вихрового гранулятора.

Розроблено математичну модель кінетики гранулювання у поличному багатоступеневому апараті зваженого шару, яка враховує зміну щільності розподілу гранул за розмірами на кожному ступені контакту.

Здійснено дослідження структури та фазового складу гранул аміачної селітри з пористим поверхневим шаром. Розроблено нові грануляційні пристрої для гранулювання у вихровому газовому потоці.

ГРАНУЛЮВАННЯ, КІНЕТИКА, ГІДРОДИНАМІКА, ВІБРАЦІЯ, ВИХРОВІ ПОТОКИ, ПСЕВДОЗРІДЖЕННЯ.

ЗМІСТ

Вступ.....	5
1 Підвищення якості гранульованого продукту за рахунок застосування вібраційного впливу.....	9
2 Одержання гранул пористої аміачної селітри у вихрових грануляторах.....	25
Висновки.....	42
Перелік посилань.....	43

ВСТУП

Виробництво товарних форм гранульованих добрив, їх модифікація і капсулювання здійснюється двома способами: приплюванням та гранулюванням у зваженому шарі. Обладнання для отримання продукції цими способами має значну матеріалоемність та низькі показники енергетичної та екологічної ефективності, характеризується недостатньою технологічною гнучкістю. Додатковий інтерес також представляє розробка багатоступеневих апаратів з активними гідродинамічними режимами для додаткової термообробки гранул. Завдяки виконанню розробки та впровадженню результатів проекту в виробництво з'являється можливість: розширити номенклатуру продукції; поліпшити споживчі властивості добрив; зменшити енерговитрати при виробництві добрив; зменшити викиди забруднюючих речовин в атмосферу.

Об'єкт наукової роботи - процеси отримання та термообробки гранульованих модифікованих та капсульованих добрив.

Предмет наукової роботи - гідродинамічні і тепломасообмінні характеристики процесів гранулювання та багатоступеневої термообробки під час одержання, модифікації та капсулювання добрив.

Мета роботи – дослідження впливу гідро- та термодинамічних показників здійснення процесу гранулювання (у тому числі капсулювання і модифікації) на якість гранульованої продукції, розробка науково обґрунтованої методики розрахунку грануляційних та сушильних пристроїв з активними гідродинамічними режимами.

Завдання, на вирішення яких спрямовано проект:

- розроблення математичної моделі розрахунку гідродинамічних параметрів однофазного та двофазного потоків;
- теоретичний опис механізму пошарової кристалізації гранул в газовому потоці;

–визначення впливу гідродинамічних характеристик потоків на процеси гранулоутворення та сушіння;

–дослідження тепломасообміну при гранулюванні у вихрових і вібраційних грануляторах та сушіння в багатоступеневих поличних апаратах;

–теоретичний опис процесів класифікації і сепарації гранул, аналіз силового впливу на краплю розплаву зовнішніх сил та визначення умов деформації і дроблення краплі під дією висхідного або закрученого газового потоку;

–порівняння і аналіз результатів теоретичних та експериментальних досліджень;

–створення методики інженерного розрахунку грануляторів з активними гідродинамічними режимами та багатоступеневих сушарок, розробка наукових основ та апаратного оформлення процесу утилізації пилу, некондиційних гранул та азотовмісних газів, методів зменшення концентрації шкідливих речовин у газах, що відходять, в технологічних лініях гранулювання;

–визначення граничних режимів ефективної роботи системи «гранулятор-утилізатор»;

–створення нових способів гранулювання сушіння і утилізації відходів виробництва та обладнання для їх здійснення.

Виконання наукової роботи базується на теоретично-експериментальному підході, що описує механізми гранулювання і сушіння в апаратах з активними гідродинамічними режимами. Наукова новизна проекту – створення механізмів управління гідродинамічними умовами руху потоків та тепломасообмінними характеристиками процесів гранулювання і термообробки (наприклад, сушіння) за рахунок комбінації або поєднання різних типів обладнання з активними гідродинамічними режимами. Новизна наукової розробки ґрунтується на аналізі наукових публікацій і патентного фонду країн-лідерів хімічної промисловості у галузі виробництва гранульованої продукції.

В основу роботи покладена ідея підвищення енергетичної та екологічної ефективності процесів диспергування і гранулювання розплавів за рахунок

застосування активних гідродинамічних режимів (вібраційний вплив на струмінь розплаву, турбулізація потоків та застосування багатоступеневого контакту фаз) та їх комбінації в грануляційному обладнанні. Іншим напрямом покращення якості гранульованої продукції є застосування вихрових потоків в грануляторах зваженого шару. Технологічний процес гранулювання в вихровому грануляторі може поєднувати в своєму робочому об'ємі процеси гранулювання, класифікації, висушування та охолодження. Вихрові гранулятори можуть застосовуватись при виробництві широкого асортименту гранульованих мінеральних добрив на основі розплавів або розчинів азотних мінеральних добрив, інших гранульованих продуктів в хімічній, харчовій, фармацевтичній, гірничодобувній та інших галузях промисловості.

В якості робочої висунуто гіпотезу про пошарове формування гранул під час нанесення на них плівки розчину і розплаву або капсулювання та зміну поверхневої структури залежно від режиму термообробки та складу рідкого матеріалу. Ця гіпотеза підтверджена результатами математичного моделювання та експериментальних досліджень. Всі одержані результати адекватно відображають характер протікання процесу гранулоутворення, визначення похибки вимірів та результатів розрахунку базується на загальноприйнятих методиках та рекомендаціях щодо проведення інженерного експерименту та обробки отриманих даних.

При проведенні досліджень математичне моделювання здійснено на підставі класичних положень механіки рідини та газу, технічної гідромеханіки теорії тепломасообміну. Фізичний експеримент проведено шляхом експериментальних досліджень стендових моделей грануляційних пристроїв. В роботі застосовано тепловізійне обладнання, термоанемометичний метод вимірювання швидкостей, растрова електронна мікроскопія та Раман-аналіз для дослідження структури гранул. Побудову теоретичних залежностей проведено диференціальними методами математичного аналізу та інтегрального обчислення.

Наукова робота складається з наступних структурних одиниць:

– теоретичний блок – математичний опис термодинамічних умов процесу гранулювання в грануляційних і сушильних пристроях;

– експериментальний блок – дослідження гідродинамічних та тепломасообмінних чинників процесів гранулювання і модифікації гранул, визначення впливу конструктивних і технологічних параметрів на якість гранульованого продукту;

– блок аналізу та співставлення результатів досліджень.

РОЗДІЛ 1 ПІДВИЩЕННЯ ЯКОСТІ ГРАНУЛЬОВАНОГО ПРОДУКТУ ЗА РАХУНОК ЗАСТОСУВАННЯ ВІБРАЦІЙНОГО ВПЛИВУ

На процес формування краплі, окрім гідродинамічних характеристик суцільної фази, значний вплив мають умови формування струменю рідкого матеріалу (характер витоку з отвору гранулятора і дроблення струменю на монодисперсні краплі).

Розпил рідкого матеріалу із накладанням вібрації на струмінь дозволяє запобігти утворенню гранул з формою, відмінною від сферичної, значно зменшує вплив потоку теплоносія на процес формоутворення частки, яка витікає з розпилювача, знижує вірогідність забруднення розпилювача і частоту його очищення в 3-5 разів, зменшує кількість зіткнень окремих крапель розплаву в 2-3 рази, повністю виключає фактор впливу на розпил нерівномірність надходження до розпилювача рідкого матеріалу, що ефективніше, ніж розпил при переході частини моменту кількості руху від фази, яка здійснює розпил, до рідкого матеріалу та розпил без надання рідкому матеріалу додаткових коливань, і забезпечує більш ефективне зрошення рідкого матеріалу на вихровий псевдозріджений шар гранул в робочому об'ємі пристрою, підвищує швидкість росту гранул до товарної фракції, що забезпечує збільшення ступеня монодисперсності отриманого гранулометричного складу готового продукту.

Формування сферичної форми відбувається за рахунок властивості рідини розпадатися на рівномірні краплі, якщо на поверхні струменю створювати регулярні коливання (хвилі) на однаковій відстані одна від одної. Отримання рівномірних крапель розплаву при його диспергуванні дозволяє здійснити принцип рівномірності, сутність якого полягає в тому, що при здійсненні процесу гранулоутворення необхідно досягти однакової дії сил, які виникають при взаємодії краплі розплаву, що витікає, та вихрового вісесиметричного потоку теплоносія, на кожну з крапель розплаву. При цьому зменшується вплив

дестабілізуючих факторів, що викликані неоднорідністю розмірів та форми крапель.

У масі плаву, який заповнює віброгранулятор, поширюються пружні хвилі. Досягаючи отворів витікання, вони періодично змінюють швидкість витікання струменю, створюючи збурення на поверхні струменів у вигляді перетяжок. У місцях перетяжок силами поверхневого натягу струменя плаву дробляться на краплі строго однакового розміру, які, падаючи в порожнині грануляційної вежі назустріч потоку холодного повітря, тверднуть в сферичні гранули.

Однорідність структури крапель, що формуються зі струменю рідкого матеріалу, та рівномірність розпилу досягається також за рахунок вирівнювання полів швидкості витікання розплаву з отворів перфорованої поверхні сферичного днища розпилювача.

Модель розпаду струменя базується на рішенні системи рівнянь Нав'є-Стокса (1.1)-(1.2) і нерозривності потоку (1.3), записаних для циліндричної системи координат [1] з урахуванням таких спрощень:

- течія є осесиметричною;

- переріз струменя залишається круговим, відбувається тільки його звуження і розширення (тангенціальна складова швидкості струменя $v_\phi = 0$).

$$v_r \frac{\partial v_r}{\partial r} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial r} + \nu \left[\frac{\partial^2 v_r}{\partial z^2} + \frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{\partial}{\partial r} (r \cdot v_r) \right) \right], \quad (1.1)$$

$$v_z \frac{\partial v_z}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} + \nu \left[\frac{\partial^2 v_z}{\partial z^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \cdot \frac{\partial v_z}{\partial r} \right) \right], \quad (1.2)$$

$$\frac{\partial v_z}{\partial z} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r \cdot v_r) = 0 \quad (1.3)$$

де, v_r , v_z - радіальна і осьова складові швидкості струменя відповідно;

r - радіус струменя;

p - тиск витікання струменя;

ρ - густина рідини що витікає.

Припустивши, що осьова складова швидкості в момент витікання змінюється по параболічному закону:

$$v_z = A_1 r^2 z^2 + A_2 r + A_3 \quad (1.4)$$

то, перетворивши рівняння (1.3), отримаємо значення радіальної складової швидкості витікання струменя:

$$v_r = \frac{-\frac{1}{2} A_1 r^4 z + F_1(z)}{r} \quad (1.5)$$

З урахуванням того, що зміна тиску в струмені в радіальному напрямку незначна в порівнянні з осьовою складовою, підставивши рівняння (1.4) в (1.2) отримаємо:

$$2(A_1 r^2 z^2 + A_2 r + A_3) A_1 r^2 z = \frac{1}{\rho} \frac{dp}{dz} + v \left(2A_1 r^2 + \frac{4A_1 r z^2 + A_2}{r} \right) \quad (1.6)$$

Вирішуючи рівняння (1.6) щодо $\frac{dp}{dz}$, закон зміни $p(z)$ уздовж осі струменя:

$$p(z) = -\frac{1}{r} \left[\rho \left(\frac{1}{2} A_1^2 r^5 z^4 + A_1 r^4 z^2 A_2 + A_1 r^3 z^2 A_3 - 2\nu A_1 r^3 z - \frac{4}{3} \nu A_1 r z^3 - \nu A_2 z \right) \right] + C_1 \quad (1.7)$$

Ввівши допущення, що при $z = 0$ початок системи координат збігається з початком витікання струменя, а витікання відбувається під постійним тиском, тоді, відповідно до рівняння (1.7), $C_l = p_l$.

Після перетворення отримаємо

$$p(z) = -\frac{1}{r} \left[\rho \left(\frac{1}{2} A_1^2 r^5 z^4 + A_1 r^4 z^2 A_2 + A_1 r^3 z^2 A_3 - 2\nu A_1 r^3 z - \frac{4}{3} \nu A_1 r z^3 - \nu A_2 z \right) \right] + p_1. \quad (1.8)$$

Підставивши (1.8) в (1.1) отримуємо диференціальне рівняння повних похідних відносно функції $F_l(z)$.

$$\begin{aligned} & \frac{\left(-\frac{1}{2} A_1 r^4 z + F_l(z) \right) \left(-2A_1 r^2 z - \frac{-\frac{1}{2} A_1 r^4 z + F_l(z)}{r^2} \right)}{r} = -\frac{1}{\rho} \left(\frac{1}{r^2} \left(\rho \left(\frac{1}{2} A_1^2 r^5 z^4 + A_1 r^4 z^2 A_2 + \right. \right. \right. \\ & \left. \left. \left. + A_1 r^3 z^2 A_3 - 2\nu A_1 r^3 z - \frac{4}{3} \nu A_1 r z^3 - \nu A_2 z \right) \right) - \frac{1}{r} \left(\rho \left(\frac{5}{2} r^4 A_1^2 z^4 + 4A_1 r^3 z^2 A_2 + 3A_1 r^2 z^2 A_3 - \right. \right. \right. \\ & \left. \left. \left. - 6\nu A_1 r^2 z - \frac{4}{3} \nu A_1 z^3 \right) \right) \right) + \nu \left(\frac{1}{r} \frac{d^2 F_l(z)}{dz^2} - 4A_1 r z \right) \end{aligned} \quad (1.9)$$

Виходячи з того, що похідна $\frac{dv_r}{dz}$ дорівнює

$$\frac{dv_r}{dz} = \frac{-\frac{1}{2} A_1 r^4 z + \frac{dF_l(z)}{dz}}{r}, \quad (1.10)$$

а радіальна складова швидкості струменя, за умови $z = 0$ стане рівною $v_r = 0$, отримуємо:

$$\frac{1}{2} A_1 r^4 z = \frac{dF_l(z)}{dz} \quad (1.11)$$

Використовуючи граничні умови $F_l(z=0)=0$ і $dz(F_l(z=0))=0$, і поставивши їх в рівняння (1.10) отримуємо значення функції $F_l(z)$ у вигляді полінома:

$$F_l(z) = \frac{1}{6} \frac{(-A_2 + 8A_1 r^3) z^3}{r} + \frac{1}{48} \frac{A_1 r^2 (3A_1 r^4 - 12A_2 r - 8A_3) z^4}{v} \quad (1.12)$$

Після підстановки залежності (1.12) в рівняння (1.5) воно зміниться до вигляду:

$$v_r = \frac{1}{48} \frac{z(-24A_1 r^5 v - 8v z^2 A_2 + 64v z^2 A_1 r^3 + 3A_1^2 r^7 z^3 - 12A_1 r^4 z^3 A_2 - 8A_1 r^3 z^3 A_3)}{v r^2}. \quad (1.13)$$

Коефіцієнт A_2 знаходиться, припустивши, що на поверхні струменя $r = r_s$ тиск p дорівнює тиску навколишнього середовища p_0 . Це гранична умова можна записати у вигляді:

$$p_0 = -\frac{1}{r_s} \left(\rho \left(\frac{1}{2} A_1^2 r_s^5 z^4 + A_1 r_s^4 z^2 A_2 + A_1 r_s^3 z^2 A_3 - 2v A_1 r_s^3 - \frac{4}{3} v A_1 r_s z^3 - v A_2 z \right) \right) + p_l \quad (1.14)$$

Звідки:

$$A_2 = -\frac{1}{6} \frac{(r_s (3z^4 A_1^2 \rho \cdot r_s^4 + 6z^2 A_1 \rho \cdot r_s^2 A_3 - 12z A_1 \rho v r_s^2 - 8\rho v A_1 z^3 - 6p_l + 6p_0))}{\rho z (A_1 r_s^4 z - v)} \quad (1.15)$$

Коефіцієнт A_3 визначимо, припустимо, що при $r = 0$, $v_r = 0$.

$$A_3 = -\frac{1}{6} \frac{3z^4 A_1^2 \rho r_s^4 + 6p_0 - 12z A_1 \rho v r_s^2 - 8\rho v A_1 z^3 - 6p_l}{z^2 r_s^2 \rho A_1} \quad (1.16)$$

З урахування цього:

$$v_z = A_1 r^2 z^2 - \frac{1}{6} \frac{3z^4 A_1^2 \rho r_s^4 + 6p_0 - 12z A_1 \rho v r_s^2 - 8\rho v A_1 z^3 - 6p_1}{z^2 r_s^2 \rho A_1} \quad (1.17)$$

Коефіцієнт A_1 визначимо, допустивши, що в точці, близької до початку системи координат $z = z_0$, швидкість витікання ще не змінює свого значення і дорівнює швидкості течії струменя в отворі. $v_z = v_{z_0}$.

$$v_{z_0} = \frac{1}{6} \frac{6A_1^2 r^2 z_0^4 r_s^2 - 3z_0^4 A_1^2 \rho r_s^4 - 6p_0 - 12z_0 A_1 \rho v r_s^2 + 8\rho v A_1 z_0^3 + 6p_1}{z_0^2 r_s^2 \rho A_1} \quad (1.18)$$

Вирішуючи отримане рівняння (1.18) щодо коефіцієнта A_1 , отримуємо:

$$A_1 = \frac{1}{3} \frac{1}{z_0^3 r_s^2 \rho (2r^2 - r_s^2)} (-4v\rho z_0^2 + 3v_{z_0} r_s^2 \rho z_0 - 6\rho v r_s^2 + (16v^2 \rho^2 z_0^4 - 24v\rho^2 z_0^3 v_{z_0} r_s^2 + 48v^2 \rho^2 z_0^2 r_s^2 + 9v_{z_0}^2 r_s^4 \rho^2 z_0^2 - 36v_{z_0} r_s^4 \rho^2 z_0 v + 36\rho^2 v^2 r_s^4 + 36z_0^2 r^2 r_s^2 \rho p_0 - 36z_0^2 r^2 r_s^2 \rho p_0 - 36z_0^2 r^2 r_s^2 \rho p_1 - 18z_0^2 r_s^4 \rho p_0 + 18z_0^2 r_s^4 \rho p_1)^{1/2}) \quad (1.19)$$

Представлена математична модель дозволяє визначити радіальну і осьову складові швидкості витікання струменя, а також встановити вплив фізико-хімічних властивостей рідини і діаметра отвору витікання на зміну довжини і швидкості течії струменя уздовж осі до її розпаду на окремі краплі (рис. 1.1, 1.2).

Рівномірність витікання струменя рідини також визначається характером розподілу швидкості її руху в робочій порожнині гранулятора і перед отвором витікання. Для дослідження гідродинаміки внутрішнього простору гранулятора і визначення характерних зон руху рідини проведено комп'ютерне моделювання з

використанням програмного продукту ANSYS CFX по створеній моделі з розрахунковою сіткою для обчислення (рис. 1.3).

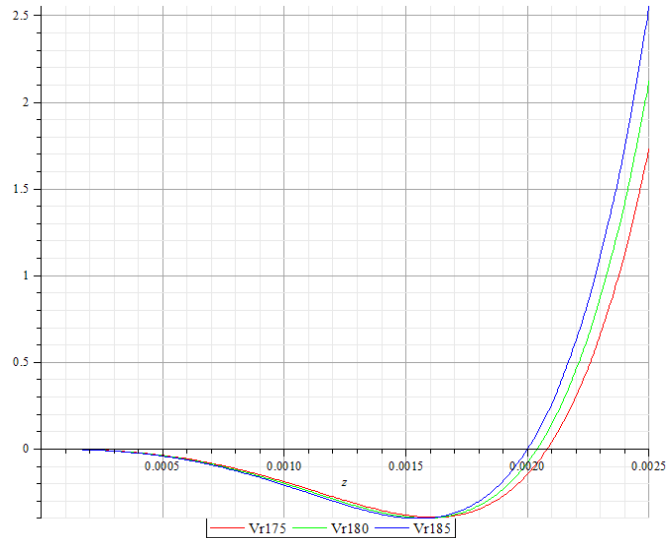


Рисунок 1.1 – Залежність зміни радіальної складової швидкості витікання розплаву аміачної селітри з отвору діаметром 1,3 мм при різних температурах (в'язкості) розплаву при $T=175^{\circ}\text{C}$, $T=180^{\circ}\text{C}$, $T=185^{\circ}\text{C}$.

Збільшення швидкості витікання рідини з пристрою досягається шляхом монтажу в нижню частину вже існуючої конструкції обертового пристрою напірних лопатей, які повторюють форму днища. Отримані результати чисельного моделювання гідродинаміки потоку пристрою без лопатей показують, що основна маса рідини, за винятком дуже тонкого прикордонного шару, який прилягає до внутрішньої поверхні оболонки, рухається з великим відставанням від оболонки. У кожний проміжок часу в області отвору витікання знаходиться нова мала частка рідини. За цей час за рахунок надлишкового тиску буде переданий імпульс у напрямку осі отвору. У цей момент відбувається витікання рідини з отвору. Так як рідина потрапляє в зону неперфорованої частини стінки оболонки, то радіальна складова швидкості рідини, яка не встигла увійти в отвір, у наступний момент часу знову стане рівною нулю. У зв'язку з тим, що зі збільшенням частоти обертання оболонки зростання тиску в ній незначне, то час

перебування рідини зменшується. При монтуванні лопатей спостерігається збільшення швидкості потоку рідини, під дією відцентрових сил, від вала до отворів витікання. Збільшення швидкості витікання потоку рідини, в середньому на 7%, відбувається зі збільшенням кількості напірних лопатей.

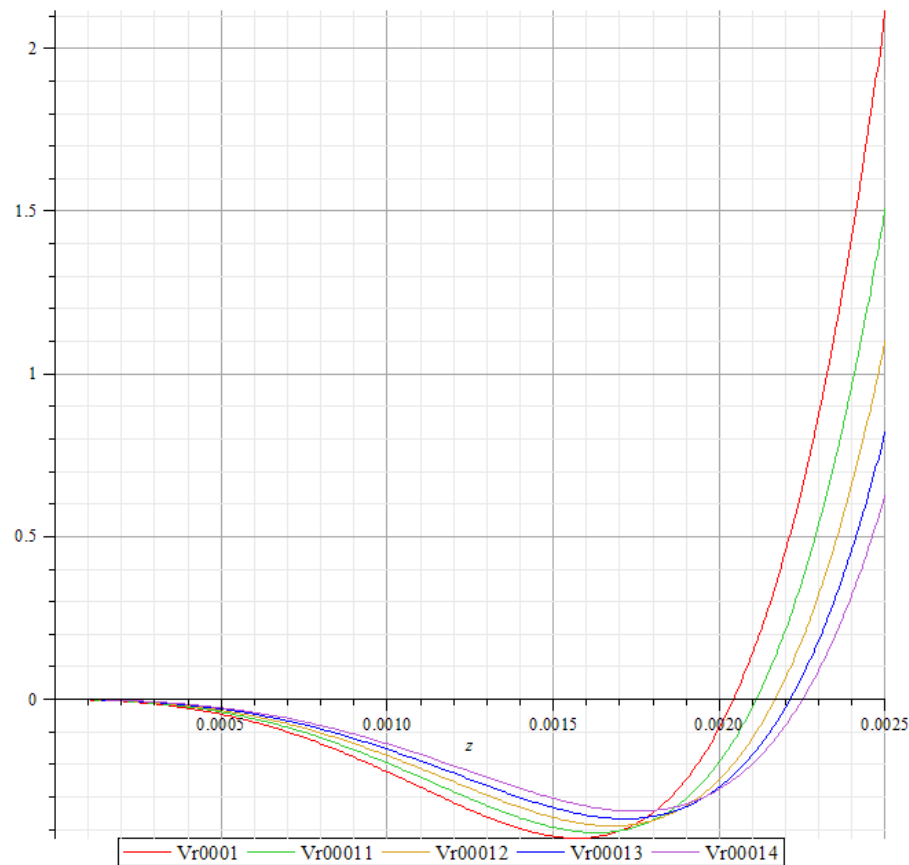


Рисунок 1.2 – Зміна радіальної складової швидкості витікання розплаву аміачної селітри з отворів різного діаметра: 1,0мм, 1,1мм, 1,2мм, 1,3мм, 1,4мм.

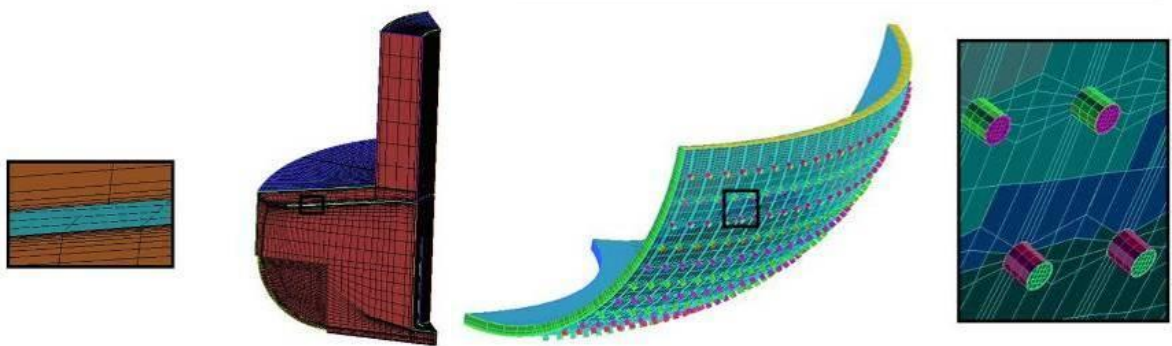
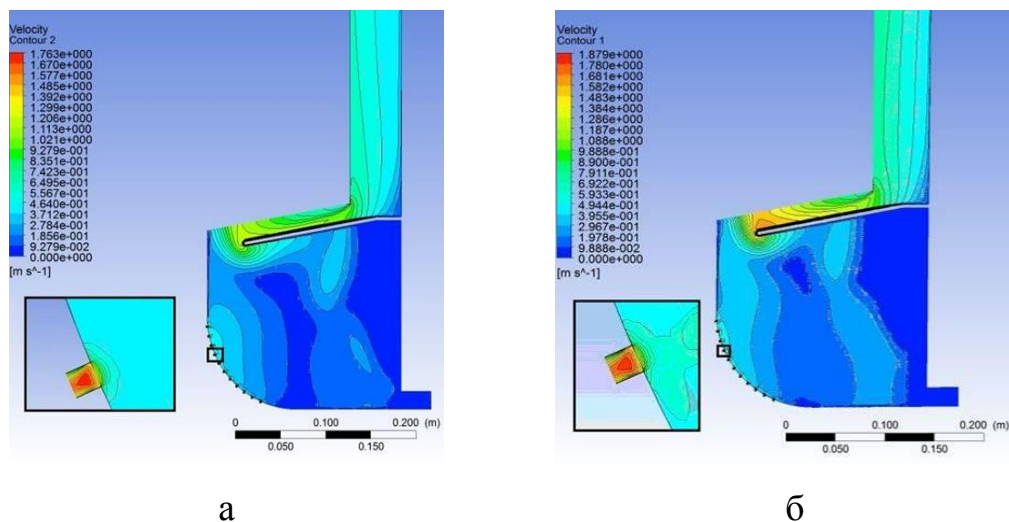


Рисунок 1.3 – Модель гранулятора і розрахункова сітка для комп'ютерного моделювання.

Таким чином можна стабілізувати та управляти витратами розплаву, що дасть можливість роботи в широкому діапазоні навантажень по розплаву з отриманням монодисперсного складу продукту [2-4].

Результати комп'ютерного моделювання гідродинаміки руху рідини у внутрішньому просторі гранулятора при різних його конструктивних виконаннях наведені на рис. 1.4-1.9 [4-8].



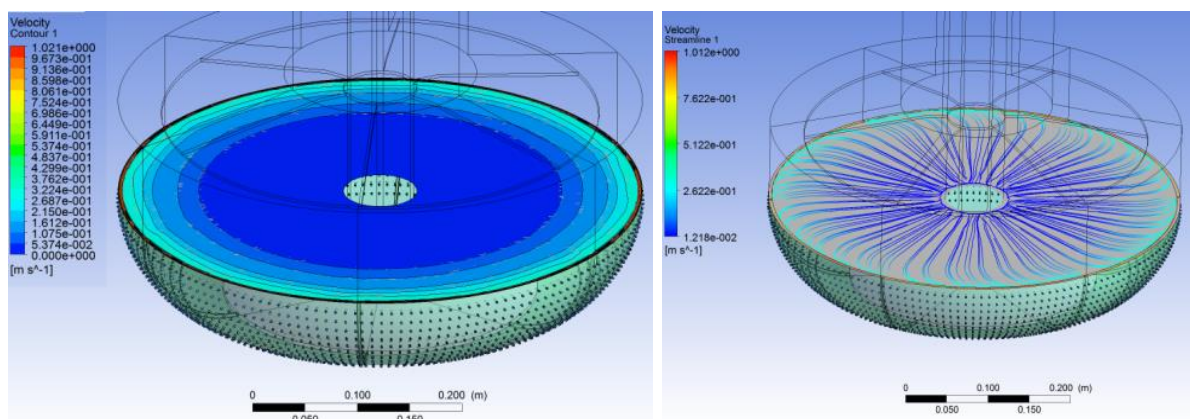
а

б

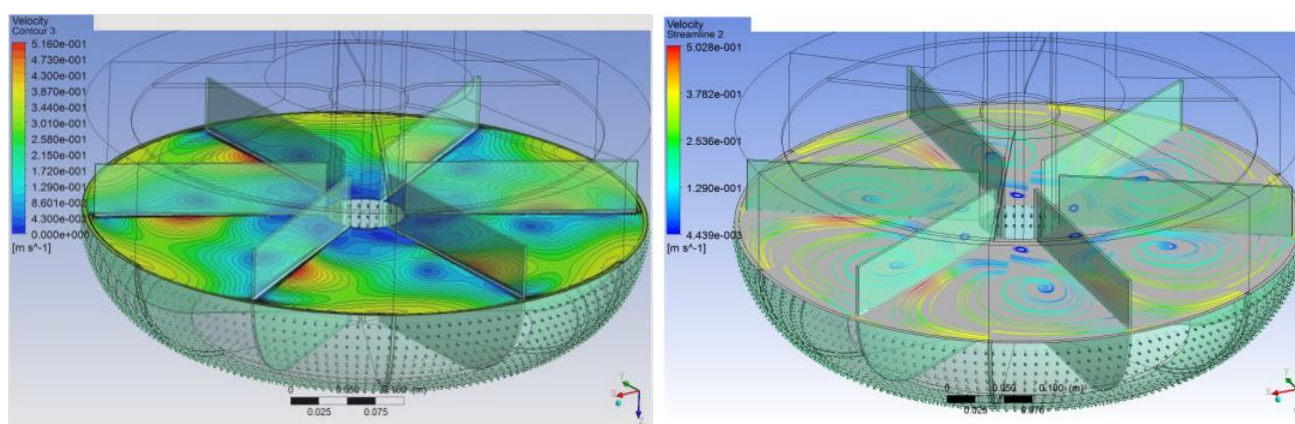
Рисунок 1.4 – Поля швидкостей обертового гранулятора з 6 прямими лопатками (а) і 7 прямими лопатками (б) при швидкості обертання гранулятора 50 об/хв.

В результаті проведення комп'ютерного моделювання отримано оптимальну кількість лопаток і їх конфігурацію, встановлено залежність швидкості витікання рідини з отворів від кількості напірних лопаток.

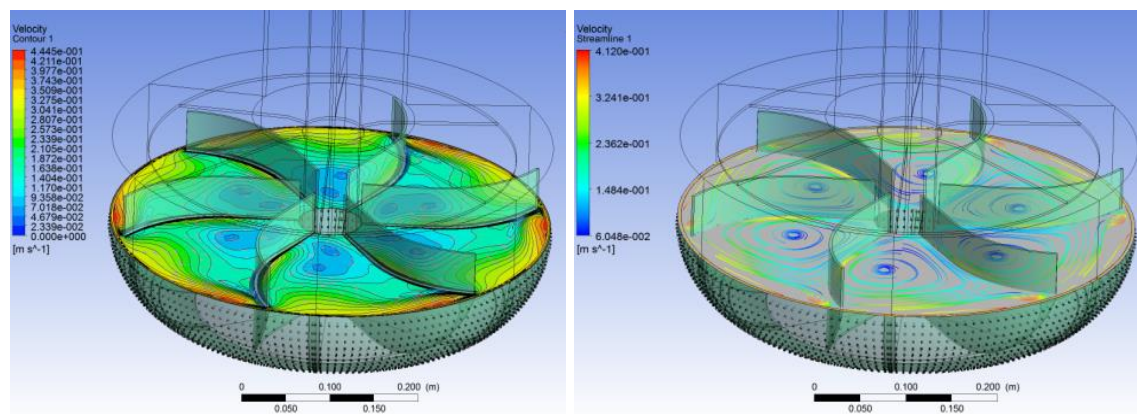
Проведений теоретичний опис процесу диспергування розплаву з перфорованих обертових оболонок на основі розробленої математичної моделі та комп'ютерне моделювання гідродинаміки руху рідини в корпусі гранулятора дозволило удосконалити конструкцію обертового гранулятора (диспергатора) з метою стабілізації гідродинамічних параметрів руху в ньому розплаву (рис. 1.10).



а

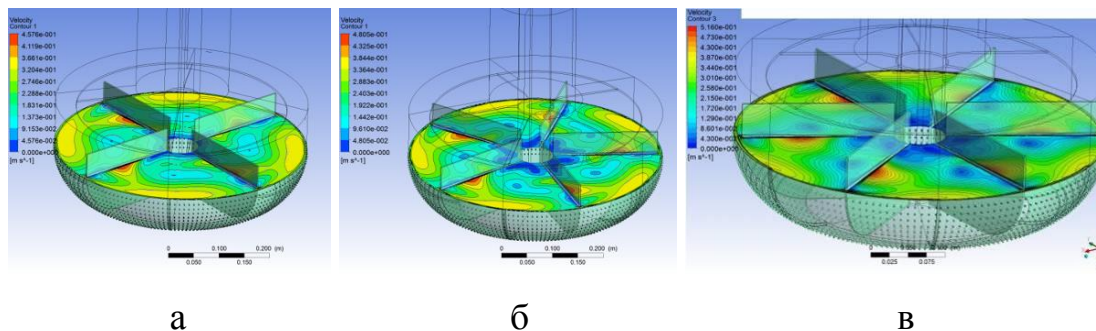


б



в

Рисунок 1.5 – Лінії струму рідини і поля її швидкостей для обертового гранулятора: а - без лопаток; б - з 6-ю прямими лопатками при швидкості обертання 50 об / хв; в - з 6-ю округлими лопатками при швидкості обертання 50 об / хв.



а

б

в

Рисунок 1.6 – Поля швидкостей обертового гранулятора з 4 прямими лопатками (а), 5 прямими лопатками (б), 6 прямими лопатками (в) при швидкості обертання гранулятора 50 об / хв.

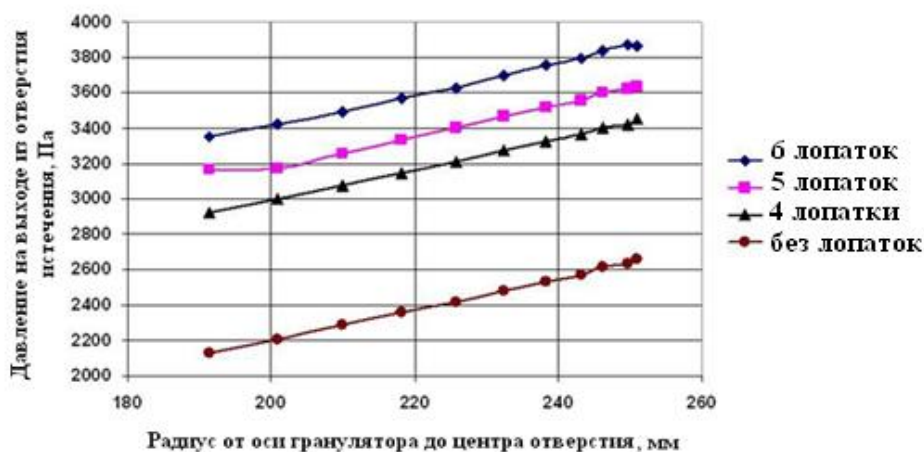


Рисунок 1.7 – Залежність тиску на виході з отворів гранулятора від радіуса розташування отвори (прямі лопатки) при швидкості обертання 50 об/хв.

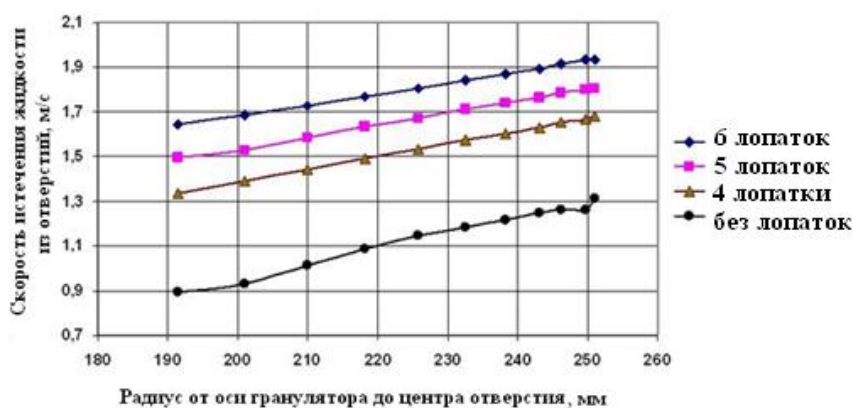


Рисунок 1.8 – Залежність швидкості витікання рідини з отворів гранулятора від радіуса розташування отворів (прямі лопатки) при різній кількості лопаток і швидкості обертання 50 об/хв.

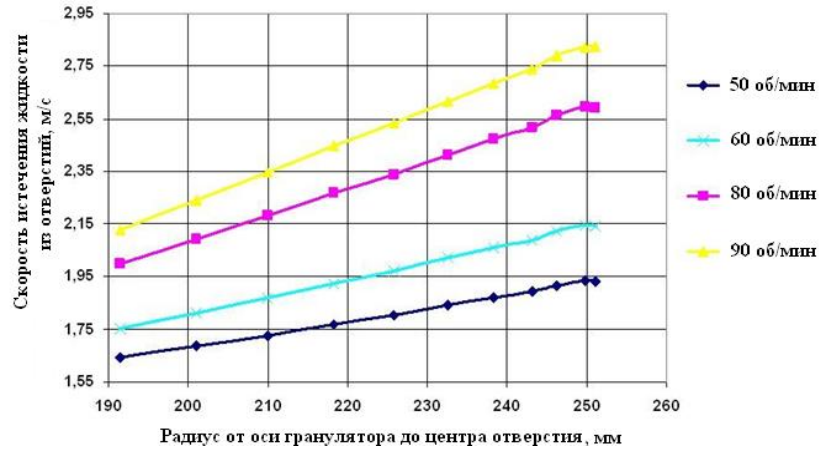


Рисунок 1.9 – Залежність швидкості витікання рідини з отворів гранулятора з 6 прямими лопатками від радіуса розташування отворів при різній швидкості обертання.

Удосконалена конструкція пристрою дозволяє поліпшити режим його роботи за рахунок:

- збільшення інтенсивності обертального руху розчину (розплаву), що дає можливість створення необхідного напору перед отворами витікання, роботи в більш широкому діапазоні навантажень по розчину (розплаву) і функціонування пристрою без коливань напору;

- зменшення ймовірності забивання отворів витікання розчином (розплавом) з перфорованого днища завдяки створенню додаткового тиску перед отворами витікання розчину (розплаву);

- підвищення ступеня монодисперсних гранул в результаті зменшення ймовірності забивання і відсутності зміни геометричних розмірів отворів витікання розчину (розплаву) з перфорованого днища;

- зменшення ймовірності зіткнення гранул і їх агломерації завдяки відсутності зміни початкової траєкторії руху струменя, що розпадається на окремі краплі;

- збільшення терміну роботи пристрою без технічного обслуговування за рахунок зменшення ймовірності забивання отворів витікання розчину (розплаву).

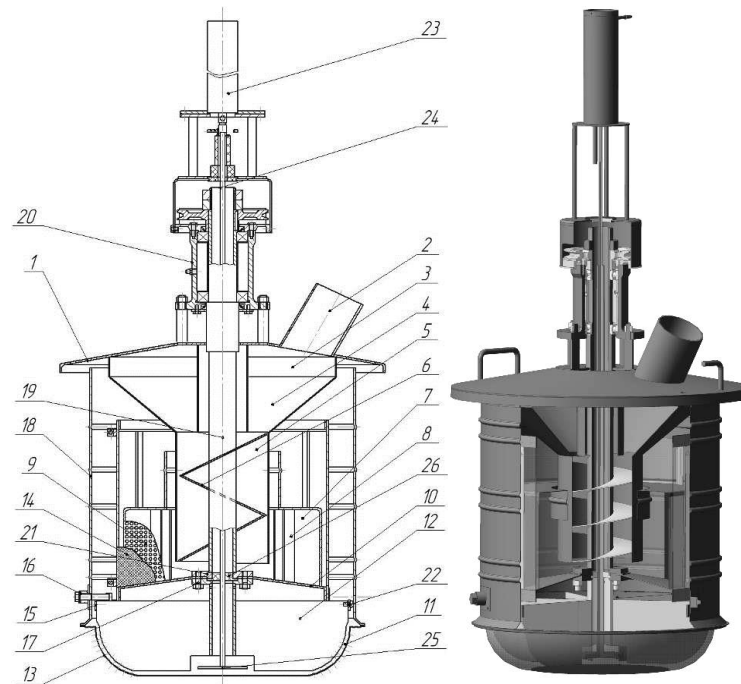


Рисунок 1.10 – Обертвий віброгранулятор розчинів (розплавів) [9]:
 1 - корпус; 2 - патрубок для введення розчину (розплаву); 3 - кільцевий колектор;
 4 - зворотній конус; 5 - кільцевий канал; 6 - шнек; 7 - розподільник розчину
 (розплаву); 8 - направляючі лопатки; 9 - перфорований циліндр;
 10 - направляючий конус для розчину (розплаву); 11 - перфороване днище;
 12 - напірні лопатки; 13 - отвори витікання; 14 - сітка для кінцевої фільтрації
 розплаву; 15 - кільце; 16 - болти; 17 - шпильки; 18 - циліндрична камера;
 19 - порожнистий вал; 20 - підшипниковий вузол; 21 - фланцеве з'єднання;
 22 - виступи для центрування циліндричної камери; 23 - вібропристрій;
 24 - шток; 25 - диск-випромінювач; 26 - втулка.

Стендові випробування гранулятора підтвердили теоретичні дослідження і проведено модернізацію конструкції обладнання. В ході випробувань було отримано стабільний розпад струменів на краплі на відстані 2-5мм від стінки перфорованої оболонки (рис. 1.11).

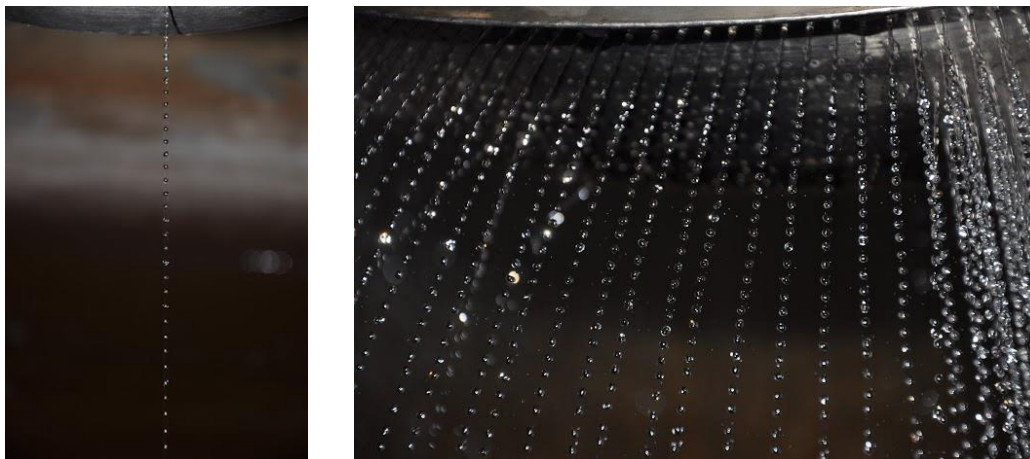


Рисунок 1.11 – Розпад струменя на краплі після витікання з перфорованої оболонки.

Дослідно-промислові випробування модифікованого диспергатора у виробництві аміачної селітри і карбаміду [10-12] показали підвищення міцності гранул і підвищення виходу товарної фракції та (рис. 1.12-1.16).

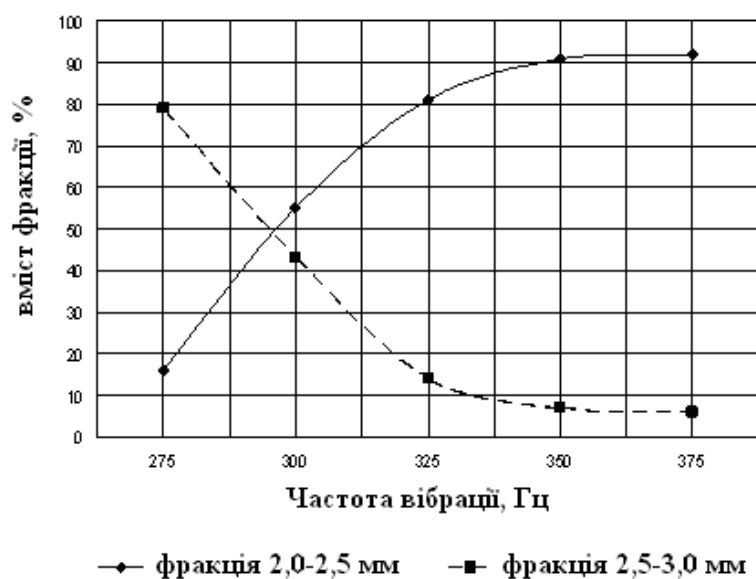


Рисунок 1.12 – Залежність діаметра гранул аміачної селітри від частоти вібрації при швидкості обертання корзини гранулятора $n=60$ об/хв та навантаженні по розплаву 37 т/год.

Міцність гранул із застосуванням модернізованого гранулятора виявилась вищою. Це пояснюється більшим ступенем монодисперсності та кращими умовами для теплообміну і формування гранул.

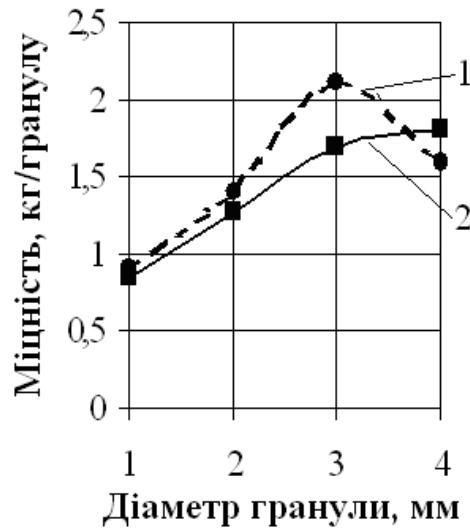


Рисунок 1.13 – Залежність міцності гранул від діаметра: 1 - модифікований диспергатор з електромагнітною вібростелею; 2 - статичний диспергатор конструкції НДІХІММАШ з акустичною вібростелею.

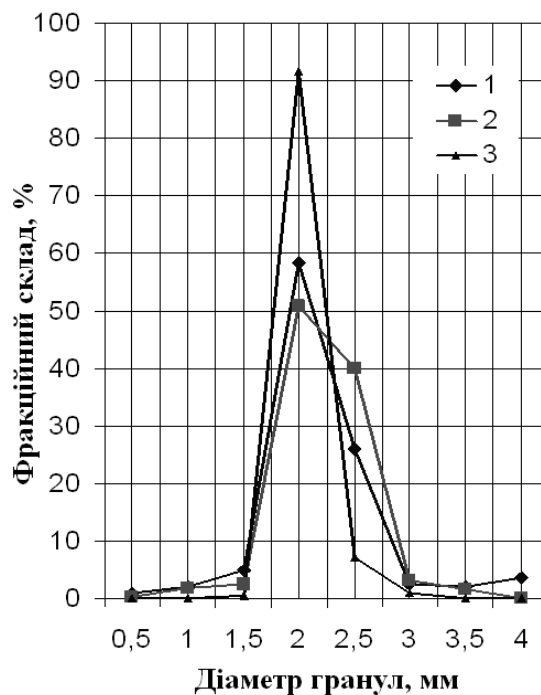


Рисунок 1.14 – Фракційний склад гранул аміачної селітри: 1 - модифікований гранулятор типу ВВГ без накладення вібрації; 2 - гранулятори типу ВВГ інших виробників; 3 - модифікований гранулятор ВВГ.

Модифікований обертовий вібраційний гранулятор ВВГ забезпечив отримання продукту наступного гранулометричного складу: масова частка гранул розміром менше 1,0 мм - 0,02-0,2%, масова частка гранул розміром 2,0-4,0 мм -

96,0-99, 9%, при цьому масова частка гранул розміром 2,0-2,5 мм становила не менше 88%. Крім того, при зміні частоти вібрації гранулятор забезпечував отримання продукту з основною фракцією гранул 2,5-3,0 мм більше 65%, при одночасному підвищенні міцності гранул основної фракції.

Виконана модифікація обертового вібраційного гранулятора розплавів азотних добрив дозволила підвищити монодисперсність продукту і знизити в ньому вміст пилоутворюючих частинок розміром менше 1,0 мм і більше 4,0 мм.

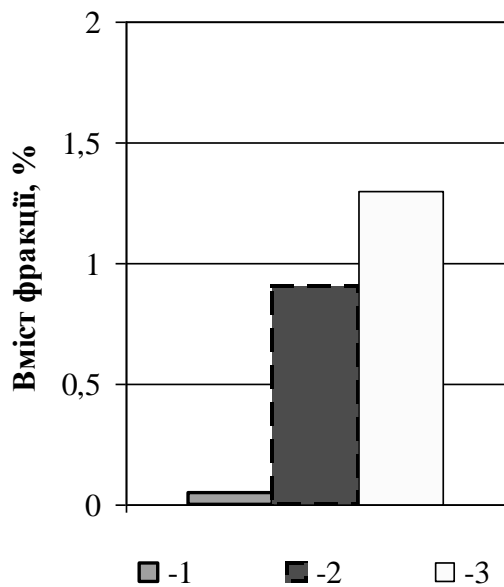


Рисунок 1.15 – Масова частка гранул розміром менше 1,0 мм в готовому продукті: 1 - модифікований гранулятор типу ВВГ; 2 - гранулятори типу ВВГ до модифікації; 3 - статичний гранулятор конструкції НДІХІММАШ.

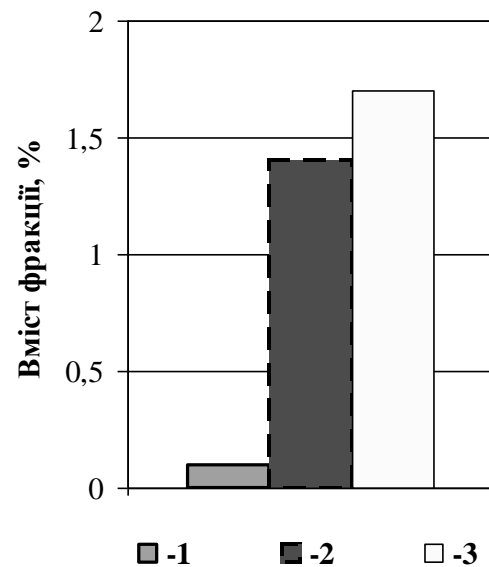


Рисунок 1.16 – Масова частка гранул розміром більше 4,0 мм в готовому продукті: 1 - модифікований гранулятор типу ВВГ; 2 - гранулятори типу ВВГ до модифікації; 3 - статичний гранулятор конструкції НДІХІММАШ.

РОЗДІЛ 2 ОДЕРЖАННЯ ГРАНУЛ ПОРИСТОЇ АМІАЧНОЇ СЕЛІТРИ У ВИХРОВИХ ГРАНУЛЯТОРАХ

Найбільш простою у виробництві й застосуванні виробничою вибуховою речовиною є пориста аміачна селітра (ПАС). ПАС також є основою для виробництва інших вибухових речовин.

Найпоширеніший спосіб виробництва ПАС заснований на змішуванні розплаву аміачної селітри з пороутворюючими й газогенерувальними домішками з наступною грануляцією. Газогенерувальні та пороутворюючі домішки сприяють утворенню пористої структури гранул ПАС, що збільшує вбираючу й утримувальну здатність гранул. При цьому баштовий спосіб виробництва має значні недоліки: громіздкість устаткування, значні витрати на його обслуговування й ремонт, неможливість створення високоінтенсивної гідродинаміки в межах вежі. Створення нових виробництв ПАС на основі баштового методу потребує значних матеріальних і трудових витрат. Також газогенерувальні та пороутворюючі домішки, які входять до складу ПАС, знижують екологічні показники ПАС [13].

Сьогодні для вибухових робіт використовується рядова аміачна селітра, яку створено для потреб аграрного сектору. Ця селітра є дешевшою за ПАС, але порівняно менш ефективною. В даний час провідні закордонні підприємства по випуску азотних мінеральних добрив та гранул пористої структури освоїли випуск гранульованого продукту, який має підвищені якісні показники, і тому гранульовані продукти виробництва України можуть втратити ринок збуту. Для одержання високої якості продукту повинні бути використані нові технологічні принципи, що дозволяють створювати структуру гранули в процесі її формування, чого не може забезпечити баштовий метод виробництва аміачної селітри [14].

Розглянемо поверхневу і внутрішню структуру гранули аміачної селітри (рис. 2.1, 2.2).

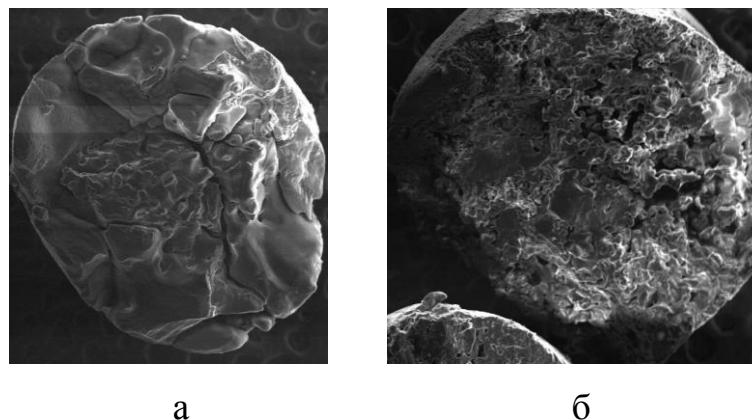


Рисунок 2.1 – Структура вихідної гранули аміачної селітри (а) і гранули пористої аміачної селітри після зволоження і термообробки (б).

Гранули аміачної селітри до зволоження і термообробки (рис. 2.1 а) мають в своєму обсязі пори які утворилися в результаті виникнення термічних напружень при кристалізації і механічного впливу при охолодженні. Гранули ПАС зволоження і термообробки (рис. 2.1 б) мають в своєму обсязі різні види пор, які утворилися в результаті випаровування і виходу аміаку вологи з гранули.

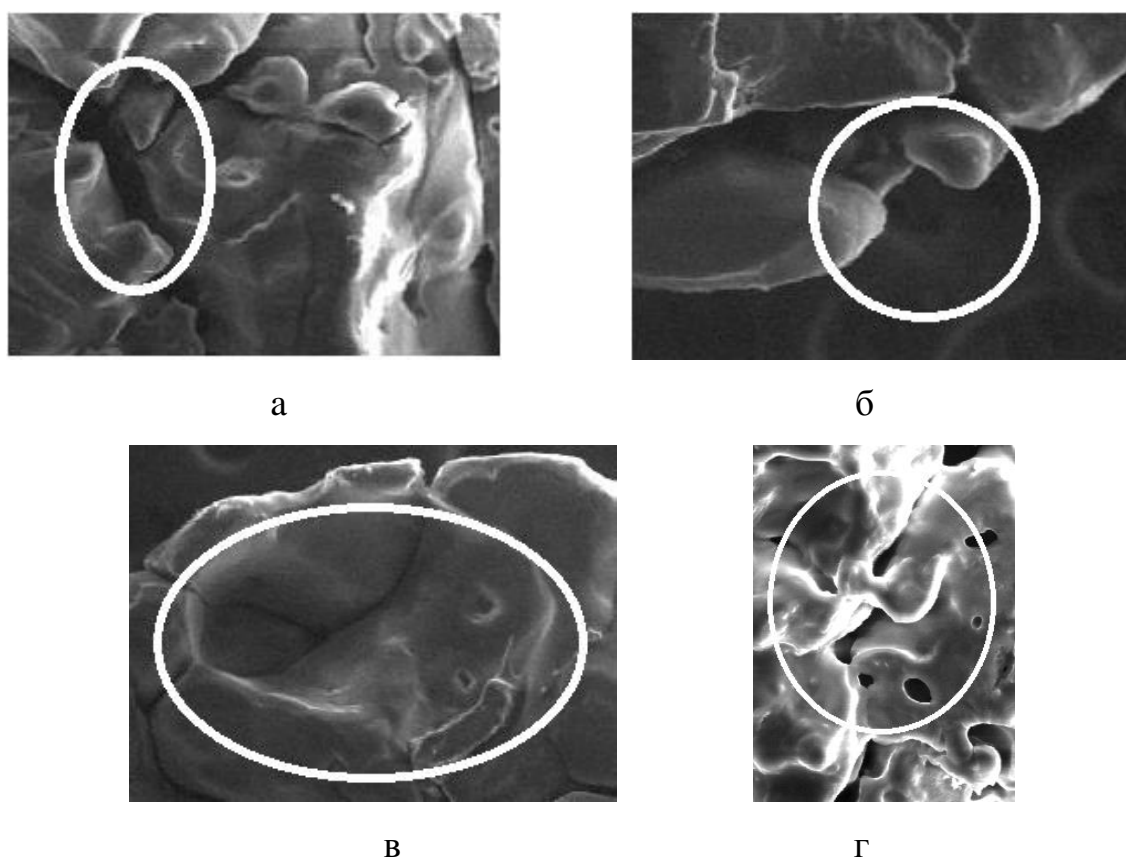


Рисунок 2.2 – Види пір в структурі аміачної селітри: тріщини (а), відколи (б), каверни (в), канали (г).

Експериментальні дослідження дозволили виділити в структурі гранули аміачної селітри такі види пор (2.2) [15, 16]:

- тріщини (2.2 а);
- відколи (2.2 б);
- каверни (2.2 в);
- канали (2.2 г).

Тріщини, відколи й каверни характерні як для вихідної гранули, так і для гранули після термообробки і зволоження. Практично всі тріщини і каверни є внутрішніми (без виходу на поверхню гранули), відколи знаходяться лише на поверхні гранули. Після зволоження і термообробки деякі тріщини можуть виходити на поверхню гранули.

Канали різної форми характерні лише для гранул ПАС. Форма цих каналів може бути як прямолінійною, так і криволінійною (звивистою). Пряма форма каналів утворюється при високих температурах в першій (конічній) зоні вихрового гранулятора. Прямолінійна форма каналу обумовлюється не тільки різким випаровуванням води, але і наявністю температурних напружень, які виникають при термообробці.

При збільшенні температури повітря і колової складової швидкості газового потоку збільшується відносна кількість прямолінійних каналів біля ядра гранули. Це призводить до зменшення міцності гранули. Канали криволінійної структури утворюються переважно біля поверхні гранули, тому волога залишає гранулу поступово і утворення криволінійних каналів більш імовірно.

Канали в об'ємі гранули можуть бути як закритими, так і відкритими. У структурі гранул обов'язкова присутність обох типів каналів. У відкритих каналах зосереджується необхідну кількість дизельного палива, в закритих каналах - кисень, необхідний для детонації вибухової речовини [17].

Гідродинамічні умови створення гранул пористої структури [18, 19].

На всіх етапах експерименту кінцеве значення вмісту води в гранулах ПАС становило не більше 0,4%.

У ході обробки результатів експерименту отримані залежності, продемонстровані на рис. 2.3-2.7.

Аналіз даних рис. 2.3 показує, що підвищення висхідній швидкості сушильного агента в межах від першої критичної і в діапазоні робочої швидкості зважування гранул заданої фракції (2-4 мм) не чинить істотного впливу на їх міцність. Значне зниження міцності гранул спостерігається при наближенні значення висхідної швидкості до другої критичної швидкості, де спостерігається процес підвищеного стирання гранул о стінки апарату, інтенсивного зіткнення їх одна з одною і винесення з об'єму апарату.

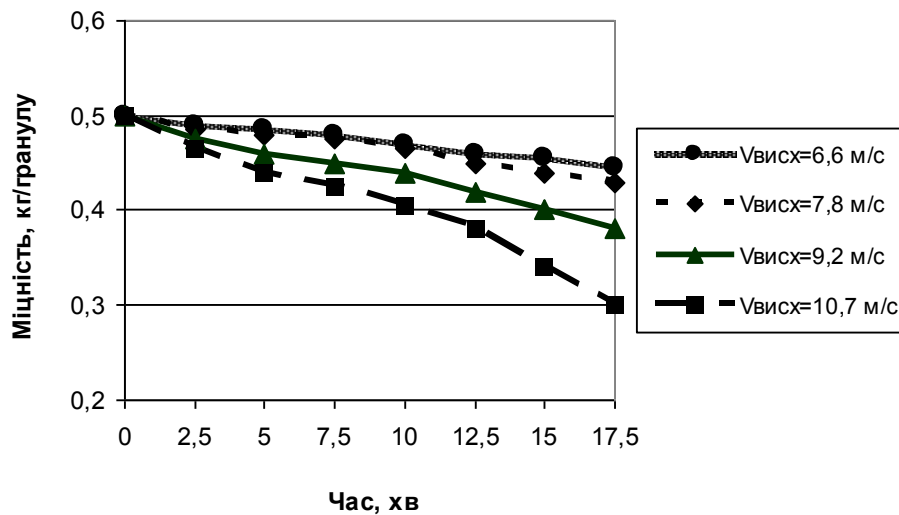


Рисунок 2.3 – Вплив висхідній швидкості сушильного агента $V_{\text{висх}}$ на міцність гранул (при значенні колової швидкості сушильного агента $V_{\text{кол}}=5,2$ м/с і температурі термообробки $t=90$ °С).

Значення колової швидкості сушильного агента чинить істотний вплив на міцність гранул (рис. 2.4). Після закінчення періоду 10-11 хвилин спостерігається помітне зниження міцності гранул, яке пояснюється посиленням взаємного впливу гарячого сушильного агента та інтенсивної закрутки шару гранул, їх подальшим стиранням і розтріскуванням. При цьому після зазначеного проміжку часу спостерігається значне зменшення фракції товарного розміру у твердій полідисперсній системі (рис. 2.5).

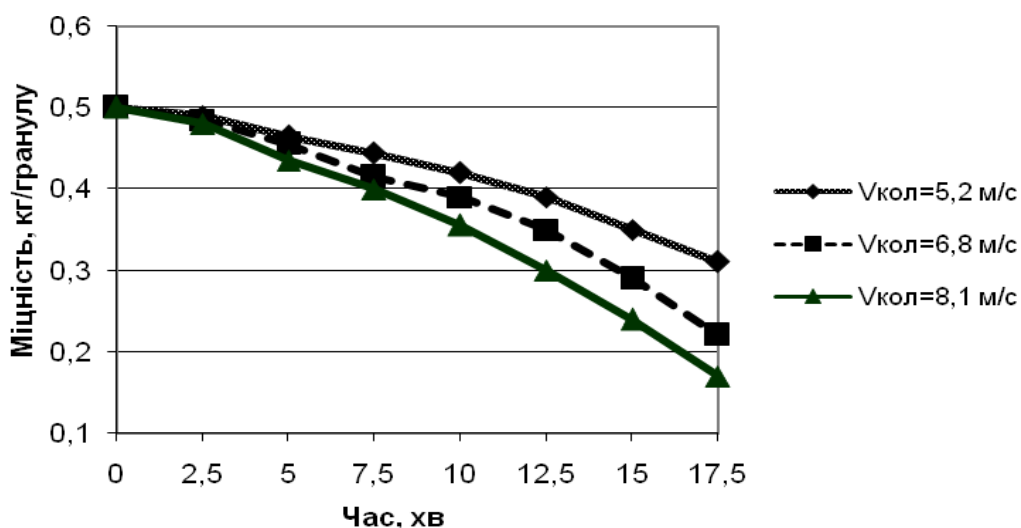


Рисунок 2.4 – Вплив колової швидкості сушильного агента $V_{\text{кол}}$ на міцність гранул (при значенні висхідної швидкості сушильного агента $V_{\text{висх}} = 7,8 \text{ м/с}$ і температурі термообробки $t=90 \text{ }^\circ\text{C}$).

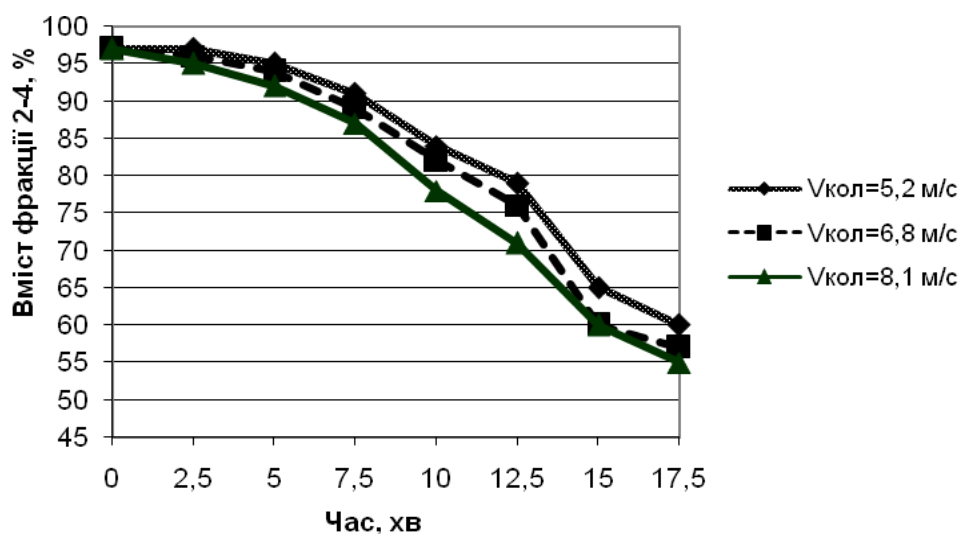


Рисунок 2.5 – Вплив колової швидкості сушильного агента $V_{\text{кол}}$ на кількість товарної фракції (при значенні висхідної швидкості сушильного агента $V_{\text{висх}} = 1 \text{ м/с}$ і температурі термообробки $t=90 \text{ }^\circ\text{C}$).

Таким чином, оптимальним часом перебування гранул в робочому просторі вихрового гранулятора слід вважати проміжок в межах 10-12 хвилин при значенні $V_{\text{висх}}=7,8 \text{ м/с}$ і $V_{\text{кол}}=5,2 \text{ м/с}$.

Оцінка впливу гідродинамічних параметрів на поглинальну здатність гранул ПАС (рис. 2.6) показала, що зі збільшенням часу їх перебування (при різному ступені закрутки сушильного агента) в межах від 8 до 12 хвилин спостерігається максимум функції. Це можна пояснити тим, що у вказаний проміжок часу на поверхні гранули завершується процес створення пористого шару, вологість досягає регламентованого значення, міцність залишається стабільно високою. Подальше зниження поглинальної здатності пов'язано з частковим руйнуванням гранул, яке тягне за собою швидке зтікання дизельного палива з їх поверхні.

Монотонне зростання утримувальної здатності гранул по відношенню до дизельного палива в часі (рис. 2.7) викликано збільшенням поверхні гранул. За час обробки в межах 10-12 хвилин на поверхні гранули утворюється пористий шар, подальше збільшення площі контакту фаз відбувається за рахунок подрібнення гранул внаслідок їх руйнування.

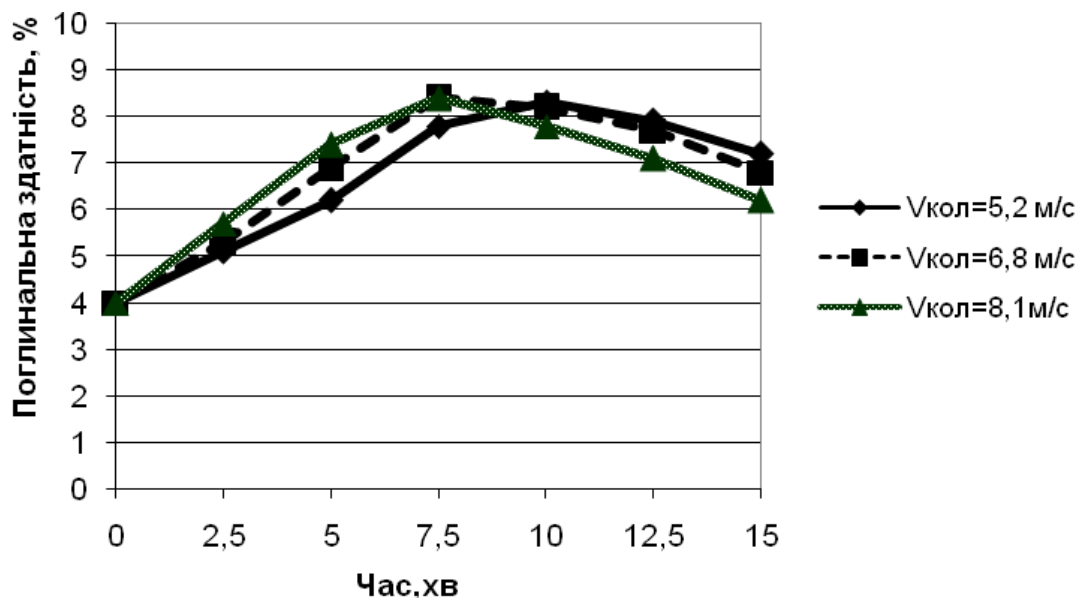


Рисунок 2.6 – Вплив колової швидкості сушильного агента $V_{\text{кол}}$ на поглинальну здатність гранул (при значенні висхідної швидкості сушильного агента $V_{\text{висх}} = 7,8 \text{ м/с}$ і температурі термообробки $t = 90 \text{ }^\circ\text{C}$).

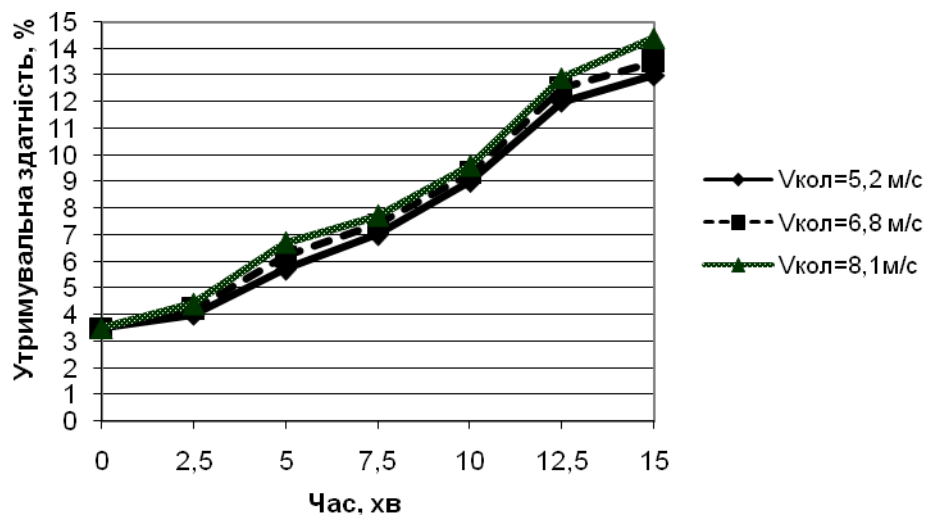


Рисунок 2.7 – Вплив колової швидкості сушильного агента $V_{\text{кол}}$ на утримувальну здатність гранул (при значенні висхідної швидкості сушильного агента $V_{\text{висх}}=7,8 \text{ м/с}$ і температурі термообробки $t=90 \text{ }^\circ\text{C}$).

Таким чином, попередньо визначений час перебування гранул у вихровому грануляторі і гідродинамічні характеристики сушильного агента можна приймати в якості оптимальних.

Термодинамічні умови створення гранул пористої структури розглянуті в роботах [18, 20-22].

Надалі серія експериментальних досліджень проводилась після прийняття отриманих гідродинамічних характеристик роботи вихрового гранулятора в якості базових.

У ході обробки результатів експерименту отримані залежності, продемонстровані на рис. 2.8, 2.9, 2.11, 2.12. Враховуючи, що кожен цикл термообробки призводить до руйнування ядра гранул, оптимальним є діапазон температур, при якому аміачна селітра зазнає мінімальну кількість модифікаційних перетворень. В якості досліджуваного прийнятий діапазон температур $80\text{-}140 \text{ }^\circ\text{C}$, в якому розташовується область існування модифікації II аміачної селітри ($84\text{-}124^\circ\text{C}$). Термообробка при температурі вище $140 \text{ }^\circ\text{C}$ призводить до інтенсивного виділення аміаку атмосферу, при температурі нижче

80 ° С - до кінцевого вмісту води в гранулах ПАС вище нормативного показника.

Монотонне зменшення кількості товарної фракції ПАС при збільшенні температури (рис. 2.8) пояснюється поступовим зниженням міцності ядра гранули з подальшим її руйнуванням під дією інтенсивного вихрового потоку сушильного агента. У міру наближення в температурі модифікаційного переходу II-I міцність гранули помітно зменшується (рис. 2.9), що знижує ступінь монодисперсності готового продукту.

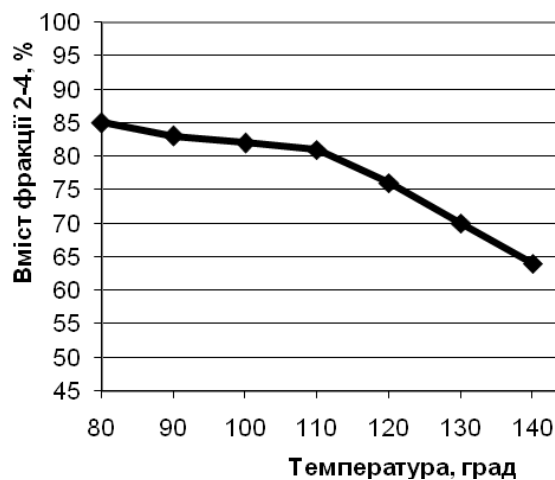


Рисунок 2.8 – Вплив температури термообробки t на кількість товарної фракції (при значенні часу перебування гранул в апараті 10-12 хвилин).

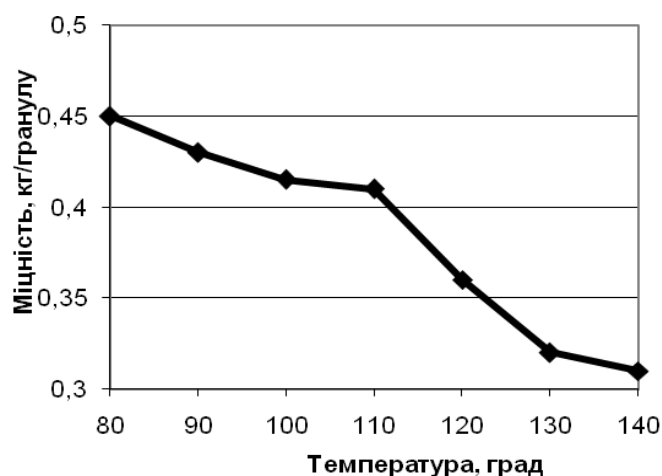


Рисунок 2.9 – Вплив температури термообробки t на міцність гранул (при значенні часу перебування гранул в апараті 10-12 хвилин).

Результати Раман-аналізу структури ПАС (рис. 2.10) показали, що вона зі-відповідає модифікації II [23]. Після зволоження і термообробки в структурі гранули ПАС відсутні нові сполуки, кристалічна решітка гранули відповідає заявленій модифікації.

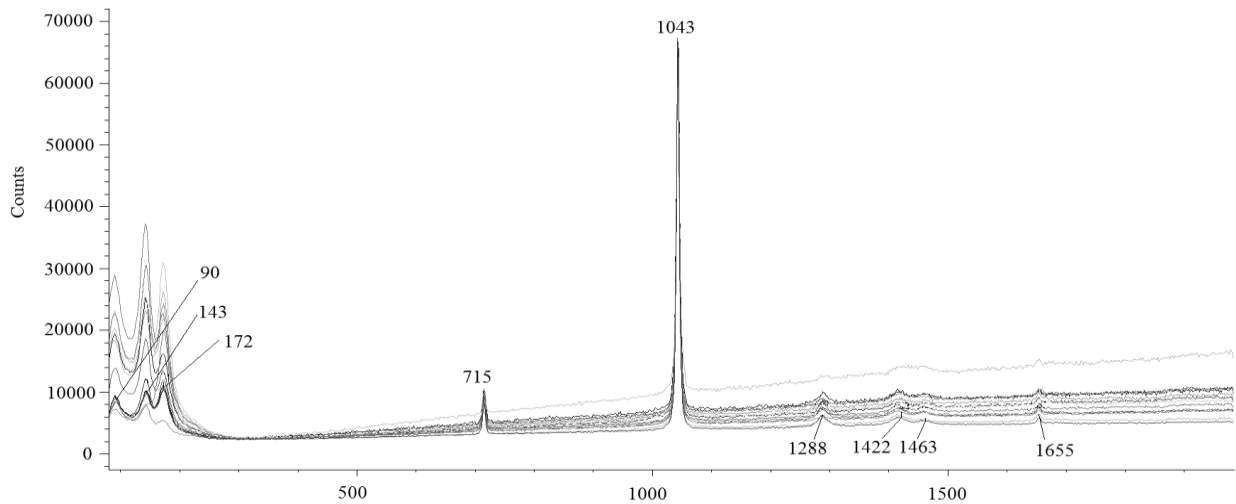


Рисунок 2.10 – Результати Раман-аналізу зразка гранули.

На поглинальну і утримувальну здатність гранул ПАС зміна температури термообробки чинить різний вплив (причиною цього є зниження міцності ядра гранули при підвищенні температури термообробки). У досліджуваному діапазоні температур міцність гранул змінюється незначно, що призводить до збереження постійного об'єму пір на поверхні гранул ПАС; таким чином, значення їх поглинальної здатності залишається незмінним (рис. 2.11).

Після проходження температури модифікаційного переходу II-I поглинальна здатність гранул знижується внаслідок підвищення інтенсивності їх руйнування. Що стосується утримувальної здатності гранул, то підвищення температури термообробки збільшує її значення (рис. 2.12), тому що руйнування гранул призводить до збільшення площі їх контакту з дизельним паливом.

Таким чином, в якості оптимальної приймається температура в межах 90-100 °С.

У всіх наведених вище серіях експериментальних досліджень зволоження гранул рядової аміачної селітри проводилось вологим повітрям.

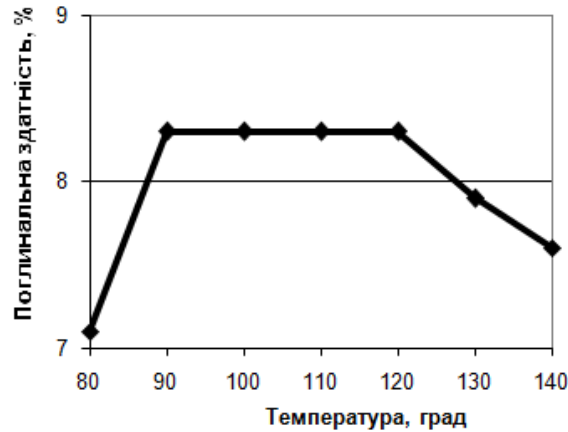


Рисунок 2.11 – Вплив температури термообробки t на поглинальну здатність гранул (при значенні часу перебування гранул в апараті 10-12 хвилин).

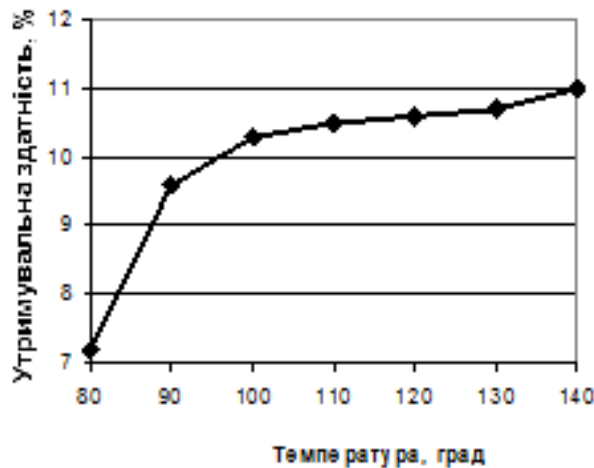


Рисунок 2.12 – Вплив температури термообробки t на утримувальну здатність гранул (при значенні часу перебування гранул в апараті 10-12 хвилин).

Вплив способу зволоження і типу зволожувача на структуру і якість гранул [24-26].

Результати досліджень, які представлені в табл. 2.1, показують, що при різних способах зволоження факел зволожувача в різного ступеня покриває поверхню вихрового зваженого шару.

Саме цим пояснюється різне значення відносної площі пористої поверхні гранул і глибина пористого шару. При диспергуванні в вихровому потоці частина зволожувача може нестися з гранулятора, не досягнувши поверхні вихрового зваженого шару. Це явище також знижує ступінь зволоження гранули.

Таблиця 2.1 – Вплив способу зволоження на структуру і якість гранул (зволожувач – вода).

Спосіб зволоження	Міцність, кг/гранулу	Поглинаюча здатність, %	Утримуюча здатність, %	Відносна площа пористої поверхні, %	Відносна глибина пористого шару, мм глибини шару / радіус гранули
Диспергування зволожувача в грануляторі:					
- верхня подача по центру апарату	0,45	7,9	6,2	68	0,1-0,15
- верхня подача в периферійні області (безпосередньо на поверхню вихрового псевдозрідженого шару)	0,45	8	6,5	74	0,1-0,15
- горизонтальна подача в псевдозріджений шар	0,43	8,1	7,3	79	0,15-0,25
- нижня подача по центру апарату	0,43	8,1	6,8	72	0,1-0,2
- нижня подача в периферійні області (безпосередньо на поверхню вихрового псевдозрідженого шару)	0,4	8,2	8,1	84	0,2-0,3
Попереднє зволоження за способом [27-29]	0,4	8,3	9,6	91	0,3-0,4

Необхідною умовою збільшення відносної площі пористої поверхні і глибини пористого шару є рівномірний контакт зволоженою гранули з потоком гарячого повітря. Іншим варіантом підвищення ефективності створення пористого

поверхневого шару і його якості є попереднє зволоження гранул з одностадійною [27, 29] або багатастадійною [28] термообробкою. Такий спосіб забезпечує поступове та рівномірне видалення вологи з гранули зі збереженням міцності її ядра. Рівномірне зволоження гранули перешкоджає утворенню додаткових внутрішніх напружень внаслідок різної інтенсивності випаровування зволожувача в різних частинах гранули.

Порівняльна характеристика поверхневої структури гранул представлена на рис. 2.13.

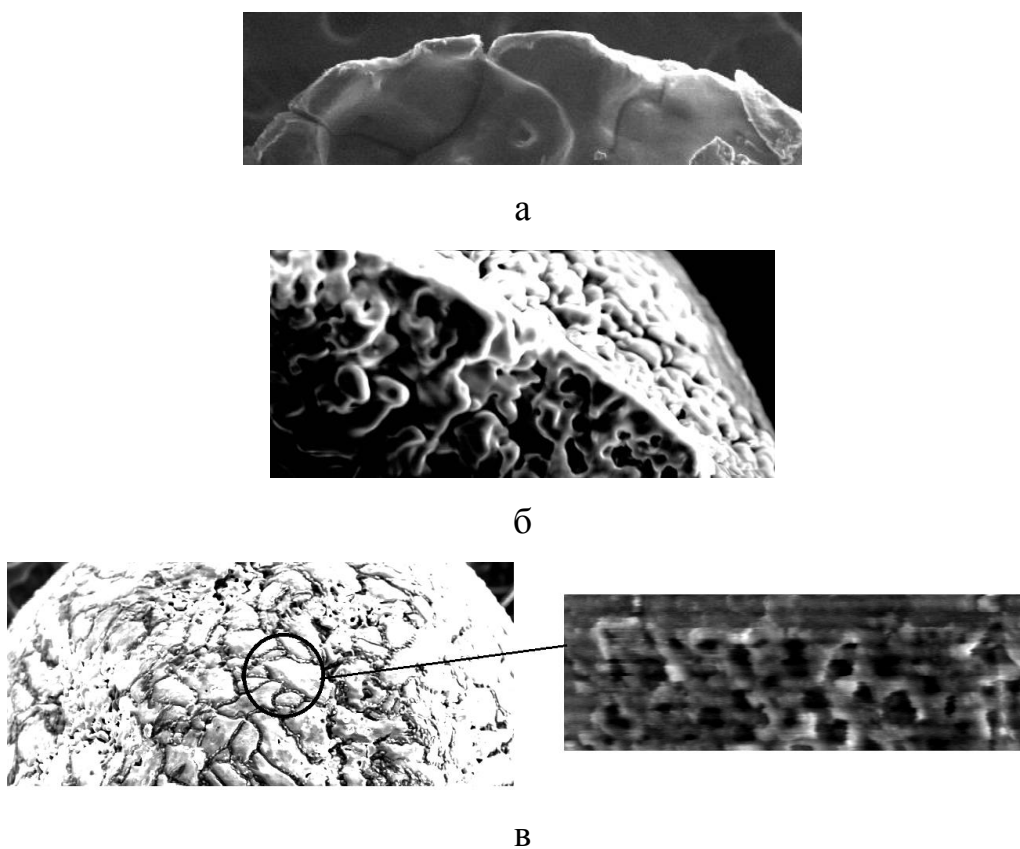


Рисунок 2.13 – Структура гранул аміачної селітри: а - поверхневий шар сухої гранули (аміачна селітра до зволоження); б - поверхневий шар гранули після зволоження і термообробки; в - гранула після зволоження і термообробки з дизельним паливом на поверхні і в порах.

Незалежно від способу зволоження на поверхні гранул утворюються характерні ділянки, які показані на рис. 2.14. Співвідношення між площами цих ділянок, для кожного способу зволоження, різне. Чим більше рівномірний

первинний контакт гранули із зволожувачем, тим менша площа непористої поверхні і велика площа поверхні з глибокими порами.

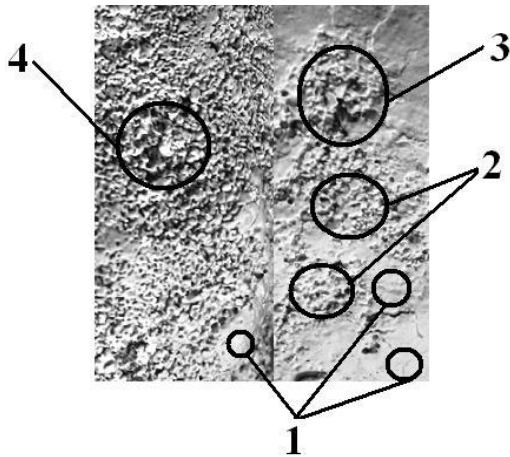


Рисунок. 2.14 – Основні ділянки на поверхні гранули ПАС: 1 - ділянка без пор; 2 - ділянка з поверхневими порами; 3 - ділянка з порами малу глибину; 4 - ділянка з глибокими порами.

Результати, які наведені в табл. 2.2, показують, що при практично рівному значенні поглинаючої здатності, залежно від типу зволожувача, гранули мають різне значення утримуючої здатності. Це можна пояснити тим, що різні типи зволожувачів є основою для формування різних типів порожнин з прямими або звивистими каналами.

Поглиналина здатність гранул зумовлена характеристикою і розміром порожнин, що утримує здатність - розміром частинок і ступенем їх руйнування. Результати досліджень також показують, що тип зволожувача впливає тільки на поглинальну і утримуючу здатності гранул. На міцність гранул впливає термодинамічний режим роботи гранулятора і час сушіння гранул.

Аналіз мікроструктури і гранулометричного складу гранул з пористим поверхневим шаром показав, що збільшення значення утримуючої здатності відбувається лише за рахунок утворення розвиненої пористої структури, а не за рахунок руйнування гранул.

Результати досліджень дозволяють підібрати оптимальне розташування диспергатора (при диспергуванні зволожувача безпосередньо в вихровому грануляторі) або найбільш ефективні умови попереднього зволоження гранул. Порівняльні показники гранул в залежності від типу зволожувача дозволяють стверджувати, що зволоження розчинами азотовмісних добрив з додаванням поверхнево-активних речовин значно ефективніше, ніж зволоження водою.

Таблиця 2.2 – Вплив типу зволожувача на якість гранул (попереднє зволоження за способом [27-29]).

Тип зволожувача	Міцність, кг/гранулу	Поглинальна здатність, %	Утримуюча здатність, %
Вода	0,4	8,3	9,6
Розчин аміачної селітри	0,4	8,4	10,1
Розчин аміачної селітри і карбаміду	0,4	8,5	11
Розчин аміачної селітри, карбаміду і лаурилсульфату натрію	0,42	8,5	11,4

Результати аналізу структури та якості гранул розглянуті в роботах [13, 16-18].

В процесі термообробки гранули селітри стають менш міцними, ніж до термообробки. Зменшення механічної міцності гранул знаходиться в прямій залежності від числа циклів термообробки, яким вони піддавалися.



а

б

в

Рисунок 2.15 – Зразки гранул (відповідно до даних рис. 5.40): а - 5 хвилин; б - 10 хвилин; в - 15хвилин.

Аналіз зразків ПАС, які отримані з вітчизняної сировини, та російського аналогу (рис. 2.15-2.18) показав наступне.

На всіх зразках пористий поверхневий шар має майже аналогічну структуру (досліджено отримані у вихровому грануляторі проби з ідентичною міцністю та утримувальною здатністю) з російським аналогом, що підтверджує високу якість гранул (рис. 2.16-2.17). Аналіз елементарного хімічного складу зразків атомно-абсорбційним методом в графітовому електротермічному та полуменовому атомізаторах показав наявність в російському зразку атомів алюмінію та марганцю, які входять до складу газогенерувальних та пороутворюючих домішок. Відсутність цих елементів в отриманій безбаштовим методом ПАС при збереженні основних показників доводить можливість застосування такої технології у виробництві.

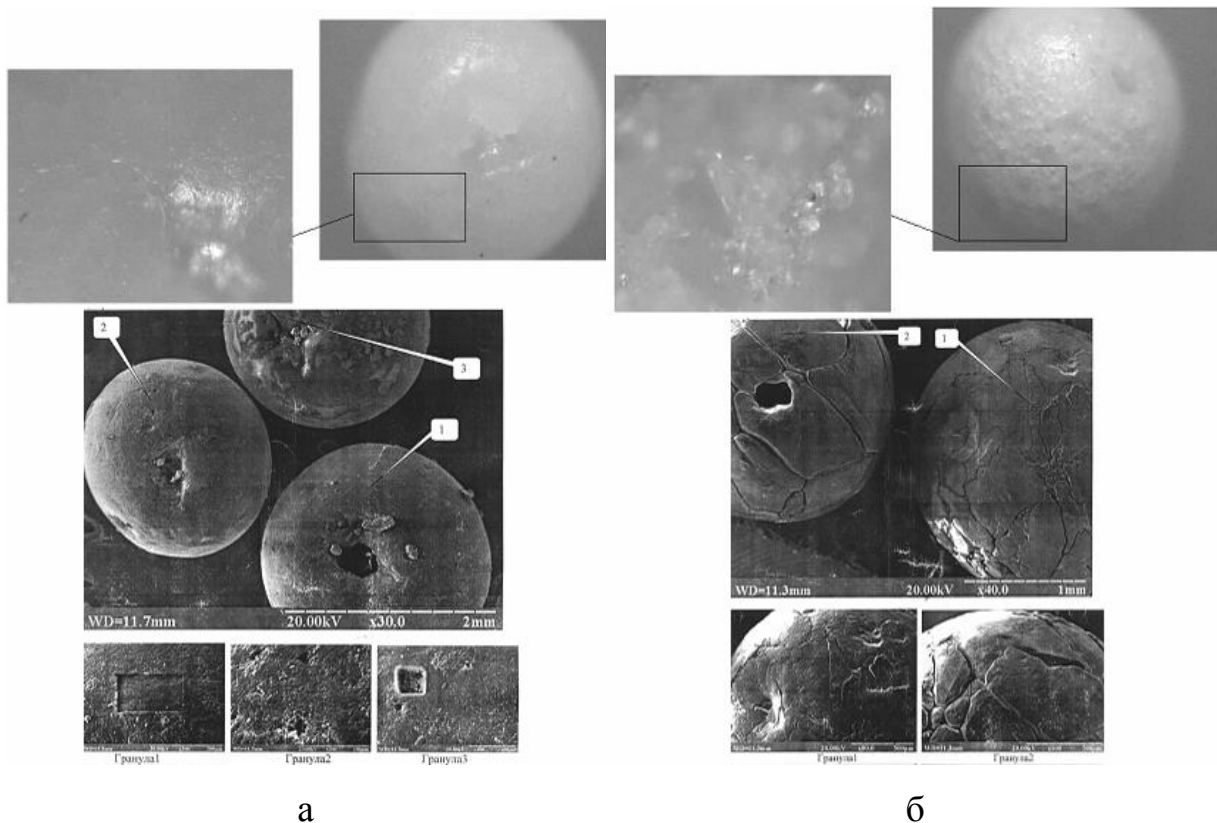


Рисунок 2.16 – Результати аналізу ПАС, яку отримано безбаштовим методом. В якості ретура використані гранули аміачної селітри виробництва «Рівне АЗОТ», м. Рівне(а) та «Дніпро АЗОТ», м. Сєверодонецьк (б).

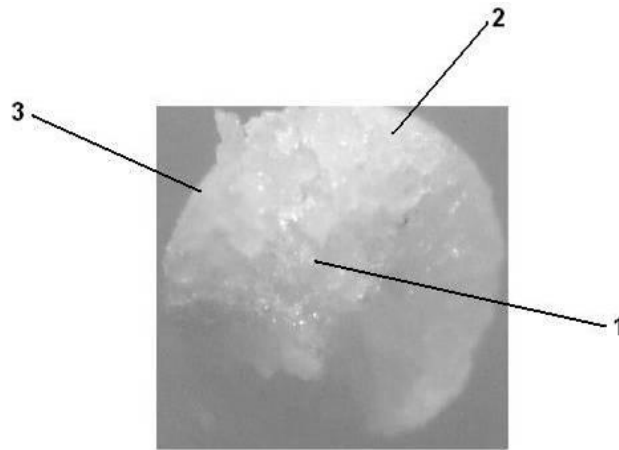


Рисунок 2.17 – Структура гранули, яку отримано за способом [27-29]:
1 – ядро гранули; 2 – перехідний шар; 3 – поверхневий пористий шар.

У результаті проведення порівняльного аналізу якісних показників отриманої в вихровому грануляторі ПАС з російським її аналогом можна зробити наступні висновки:

- поглинальна здатність по дизельному паливу ПАС, отриманої в вихровому грануляторі, коливається в межах 8,3 % (російський аналог - 8,2%) при нормативному значенні показника не менше 8 %;

- утримувальна здатність по дизельному паливу ПАС, отриманої в вихровому грануляторі, коливається в межах 9-11 % (російський аналог - 6,8%) при нормативному значенні показника не менше 5,6 %;

- міцність гранул ПАС, отриманої в вихровому грануляторі, коливається в межах 0,4-0,45 кг/гранулу (російський аналог - 0,4 кг/гранулу) при нормативному значенні показника не менше 0,4 кг/гранулу.

Отриманий продукт завдяки порівняльно низькій температурі процесу у вихровому грануляторі (на 30-50°C в порівнянні з баштовим методом виробництва) і відсутності модифікаційних перетворень забезпечує присутність в ядрі гранули бульбашок повітря, які сприяють підвищенню вибухових властивостей продукції зі збереженням механічної міцності та зменшенням кількості циклів термообробки.

При використанні спученої після термообробки ПАС реакція детонації ПВВ сповільнюється внаслідок порушення кристалічної структури гранули (створення розломів в кристалі). В отриманих зразках ПАС завдяки застосуванню нової технології і зниження температури проведення процесу в центрі ядра після висушування залишаються бульбашки повітря, які сприяють початку реакції детонації ПВВ. Швидкість детонації ПВВ склала 2,2-2,3 км/с.

ВИСНОВКИ

1. Здійснено теоретичний опис процесу формування краплі у зустрічному вихровому газовому потоці, у т.ч. при накладанні на струмінь рідини вібрації. Проведено серію експериментальних досліджень механізму пошарової кристалізації гранул у вихровому газовому потоці. Запропоновано оптимальні умови диспергування рідкої фази в робочий об'єм гранулятора, встановлено вплив конструкції газорозподільних пристроїв на конфігурацію вихрового зваженого шару в умовах різного ступеню стисненості потоку гранул. Проведено теоретичний опис кінетики прогріву гранули та видалення з неї вологи, експериментально визначено вплив гідродинамічних показників руху газового потоку на термодинамічні показники робочого простору вихрового гранулятора.

2. Впроваджено сучасні методи визначення термодинамічних характеристик робочого простору вихрового гранулятора з використанням тепловізійного обладнання та дослідження структури гранул на основі растрової електронної мікроскопії, атомно-абсорбційного та Раман-аналізу.

3. Здійснено дослідження структури та фазового складу гранул аміачної селітри з пористим поверхневим шаром. Розроблено нові грануляційні пристрої для гранулювання у вихровому газовому потоці.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Sklabinskyi, V.I. Decay of melt's stream of during dispersion in granulation devices / V.I. Sklabinskyi, A.E. Artyukhov, N.P. Kononenko // *Transilvanian Review*, 2016. – P. 24-34.
2. Скиданенко, М.С. Дослідження гідродинаміки пристроїв для створення монодисперсних мікрокрапель / М.С. Скиданенко, В.І. Склабінський, А.Є. Артюхов., С.О. Лугова // *Комп'ютерне моделювання в хімії, технологіях і системах сталого розвитку: матеріали Третьої міжнародної науково-практичної конференції*. – Київ-Рубіжне, 2012. – С. 85-87.
3. Скиданенко, М.С. Влияние гидродинамики движения потоков и свойств инертной среды на качество продукта при гранулировании способом диспергирования / М.С. Скиданенко, А.Н. Демченко, В.И. Склабинский, А.Е. Артюхов // *Инновационные технологии в производстве, науке и образовании: материалы II Международной научно-практической конференции*. – Махачкала, 2012. – С. 315-322.
4. Skidanenko M., Artyukhov A. The hydrodynamic flows and inertial environment influence on the product quality at granulation using dispersion // *Scientific enquiry in the contemporary world: theoretical basics and innovative approach*. FL, USA, L&L Publishing, 2012. – p. 169-171.
5. Склабінський, В.І. Підвищення ефективності отримання монодисперсних гранул / В.І. Склабінський, М.С. Скиданенко, А.Є. Артюхов // *Хімічна технологія: наука та виробництво: матеріали I Міжнародної науково-технічної конференції*. – Суми, 2012. – С. 97.
6. Артюхов, А.Е. Исследование условий истечения струи и формирования монодисперсных микрокапель в потоке охлаждающей среды / А.Е. Артюхов, М.С. Скиданенко // *II Международная Казахстанско-Российская конференция по химии и химической технологии: материалы конференции*. – Караганда, 2012. – Том I. – С. 43-47.

7. Скиданенко, М.С. Дослідження гідродинаміки пристроїв для створення монодисперсних мікрокрапель / М.С. Скиданенко, В.І. Склабінський, А.Є. Артюхов., С.О. Лугова // Комп'ютерне моделювання в хімії, технологіях і системах сталого розвитку: матеріали Третьої міжнародної науково-практичної конференції. – Київ-Рубіжне, 2012. – С. 85-87.
8. Скиданенко, М.С. Влияние гидродинамики движения потоков и свойств инертной среды на качество продукта при гранулировании способом диспергирования / М.С. Скиданенко, А.Н. Демченко, В.И. Склабинский, А.Е. Артюхов // Инновационные технологии в производстве, науке и образовании: материалы II Международной научно-практической конференции. – Махачкала, 2012. – С. 315-322.
9. Патент на корисну модель 68829 Україна, МПК В01J2/02. Обертовий віброгранулятор розплавів / В.І. Склабінський, А.Є. Артюхов, М.С. Скиданенко, В.М. Покотило, А.В. Іванія; заявник та патентовласник Сумський державний університет. – №u201112007; заявл. 12.10.2011; опубл. 10.04.2012, Бюл. №7.
10. Sklabinskyi, V.I. Environmental aspects implementation of high-granulation equipment for the production of nitrogen fertilizers / V.I. Sklabinskyi, A.E. Artyukhov, N.P. Kononenko // International Journal of Sustainable Development. – Varna, 2013. – Vol. 13. – pp. 10-16.
11. Артюхов, А.Е. Анализ результатов промышленного внедрения вращающихся вибрационных грануляторов плава в агрегатах получения аммиачной селитры / А.Е. Артюхов, Н.П. Кононенко // Вісник Сумського державного університету. Серія Технічні науки. –Суми, 2013. - №1. - С. 35-41.
12. Sklabinskyi, V.I. Quality improvement of granular nitrogen fertilizer in the prilling plants / V.I. Sklabinskyi, A.E. Artyukhov, N.P. Kononenko, P.C. Rossi // CLICAP 2015: Congreso Latinoamericano de Ingeniería y Ciencias Aplicadas. – 2015. – pp. 611-618.

13. Артюхов, А.Є. Перспективи отримання гранул з особливими властивостями в малогабаритних вихрових апаратах / А.Є. Артюхов, О.О. Ляпощенко, В.І. Склабінський // Вісник Сумського державного університету. Серія Технічні науки. – Суми, 2009. – №4. – С. 14-21.
14. Склабінський, В.І. Перспективи застосування малогабаритних вихрових апаратів у виробництві гранул з особливими властивостями / В.І. Склабінський, А.Є. Артюхов // Наукові дослідження – теорія та експеримент - 2009: матеріали П'ятої Міжнародної науково-практичної конференції. – Полтава, 2009. –Т.8. – С. 92-94.
15. A.E. Artyukhov. Kinetics of heating and drying of porous ammonium nitrate granules in the vortex granulator. Proc. Int. Conf. NAP-2016, Vol. 5 No 2, 02NEA02 (2016).
16. Artyukhov, A.E. The prospects of granules getting with the specific properties in small-sized vortex devices / A.E. Artyukhov // Acta Universitatis Pontica Euxinus. – 2011. – Vol. III. – pp. 19-20.
17. Artyukhov A.E. Production of granules with special properties in small-sized vortex devices / A.E. Artyukhov, V.I. Sklabinskyi // Modern scientific research and their practical application. – Odessa, 2012. - Volume J31207. – pp. 138-147.
18. Артюхов, А.Е. Опытно-промышленное внедрение процесса получения пористой аммиачной селитры в вихревых грануляторах / А.Е. Артюхов, В.И. Склабинский // Научный вестник Национального горного университета. – 2013. – №6. – С. 42-48.
19. Склабінський, В.І. Перспективи застосування малогабаритних вихрових апаратів у виробництві гранул з особливими властивостями / В.І. Склабінський, А.Є. Артюхов // Наукові дослідження – теорія та експеримент - 2009: матеріали П'ятої Міжнародної науково-практичної конференції. – Полтава, 2009. –Т.8. – С. 92-94.

20. A.E. Artyukhov, A.A. Voznyi. Thermodynamics of the vortex granulator's workspace: the impact on the structure of porous ammonium nitrate. Proc. Int. Conf. NAP-2016, Vol. 5 No 2, 02NEA01 (2016).
21. Artyukhov A.E. Application of vortex granulators in technology of ammonium nitrate obtaining: main advantages and environmental aspects of implementation / A.E. Artyukhov, P.C. Rossi / Journal of Petroleum & Environmental Biotechnology. – 2015. – Vol. 7. – Is. 1. – 1000256.
22. Артюхов, А.Є. Малогабаритні апарати з інтенсивною гідродинамікою для одержання гранул з особливими властивостями / А.Є. Артюхов, М.О. Кочергін // Технологія-2011: матеріали XIV Всеукраїнської науково-практичної конференції студентів, аспірантів та молодих вчених з міжнародною участю. – Сєверодонецьк, 2011. – Ч. 1. – С. 223.
23. H.C. Tang, B.H. Torrie, J. Phys. Chem. Solids 38, 125 (1977).
24. A.E. Artyukhov. Kinetics of heating and drying of porous ammonium nitrate granules in the vortex granulator. Proc. Int. Conf. NAP-2016, Vol. 5 No 2, 02NEA02 (2016).
25. Artem Artyukhov, Pavlo Boiko, Viktor Obodiak. Vortex granulator: calculation of hydro- and thermodynamic conditions of granules with porous structure creating / IV international scientific conference «Advanced information systems and technologies». – Sumy, 2016. – p. 33-34.
26. Артюхов А.Е. Получение гранул с особыми свойствами в малогабаритных вихревых аппаратах / А.Е. Артюхов, В.И. Склабинский // Перспективные инновации в науке, образовании, производстве и транспорте - 2012: материалы международной научно-технической конференции. – Одесса, 2012. – Т. 6. – Выпуск 2. – С. 90-93.
27. Патент 90798 Україна, МПК В01J 2/16, В01J 8/08, В01J 8/18. Спосіб отримання гранул пористої структури та пристрій для його здійснення / А.Є. Артюхов, В.І. Склабінський, К.В. Жеба; заявник та патентовласник

Сумський державний університет. – №а200812720; заявл. 30.10.2008; опубл. 25.05.2010, Бюл. №10.

28. Патент 99023 Україна, МПК В01J 2/00, В01J 2/16. Спосіб отримання гранул пористої структури та пристрій для його здійснення / А.Є. Артюхов, В.І. Склабінський; заявник та патентовласник Сумський державний університет. – №а201014887; заявл. 13.12.2010; опубл. 10.07.2012, Бюл. №13.
29. Патент на корисну модель 93649 Україна, МПК В01J 2/16. Пристрій для одержання гранул пористої структури / А.Є. Артюхов, О.С. Фурса, К.В. Москаленко; заявник та патентовласник Сумський державний університет. – №u201404719; заявл. 05.05.2014; опубл. 10.10.2014, Бюл. №19.