

УДК 66.099

№ 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-р. фіз.-мат. наук, професор

_____ А.М. Черноус

ЗВІТ

ПРО НАУКОВО-ДОСЛІДНУ РОБОТУ

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

ВІДПРАЦЮВАННЯ ТЕХНОЛОГІЇ ОДЕРЖАННЯ МІНЕРАЛЬНИХ ДОБРИВ,
БАГАТОШАРОВИХ ТА МОДИФІКОВАНИХ ТА КАПСУЛЬОВАНИХ ГРАНУЛ. РОЗРОБКА
МЕХАНІЗМІВ УТИЛІЗАЦІЇ ВИКИДІВ У ВИРОБНИЦТВІ ГРАНУЛЬОВАНОЇ ПРОДУКЦІЇ
(остаточний)

Начальник НДЧ

канд. фіз.-мат. наук, с.н.с.

Д.І. Курбатов

Керівник НДР

канд. техн. наук, доцент

А.Є. Артюхов

2018

Рукопис закінчено 20 червня 2018 р.

Результати цієї роботи розглянуті науковою радою, протокол від 2018.06.27 № 9

СПИСОК АВТОРІВ

Керівник НДР

канд. техн. наук, доцент

А.Є. Артюхов

(розд. 1, 2, 6, висновки)

Відповідальний виконавець:

молодший науковий співробітник

А.В. Іванія

(вступ, розд. 3)

Виконавці:

Старший науковий співробітник

канд. техн. наук

Н.О. Артюхова

(розд. 4)

Старший науковий співробітник

канд. техн. наук

Р.О. Острога

(розд. 5, реферат)

РЕФЕРАТ

Звіт про НДР: 140 с., 2 табл., 125 рис., 57 джерел.

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

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

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 зневоднення, а також зіставленням розрахункових та експериментальних даних.

При виконанні НДР були отримані наступні *наукові та прикладні результати*:

– знайшла подальшого розвитку математична модель розрахунку гідродинамічних параметрів однофазного та двофазного потоків в вихрових грануляторах;

– на основі експериментальних досліджень встановлено вплив конструкції гранулятора та технологічних параметрів потоків на інтенсивність

гранулювання і якість гранул. Показано, що за рахунок раціонального підбору конструктивних елементів вихрового гранулятора стає можливим забезпечити мінімально необхідний час зневоднення гранул без їх руйнування;

- визначено оптимальні гідродинамічні та термодинамічні умови сушіння в багатоступневих поличних апаратах, при яких видаляється задана кількість вологи при збереженні характеристик міцності та монодисперсності гранульованого продукту;

- теоретично описано та експериментально досліджено процеси тепломасообміну при здійсненні гранулюванні у вихрових грануляторах та сушіння в багатоступневих поличних апаратах;

- запропоновано нові способи утилізації відходів грануляційних установок та проведені експериментальні дослідження з визначення їх ефективності;

- розроблено методики інженерного розрахунку грануляторів з активними гідродинамічними режимами та багатоступневих сушарок;

- на основі авторських математичних моделей створено пакет прикладних програм для розрахунку основних показників роботи грануляційного та сушильного обладнання.

Практична значимість отриманих результатів.

Створено дослідно-промисловий зразок вихрового гранулятора для одержання гранульованої продукції. Одержано зразки гранульованої продукції (комплексних мінеральних добрив, гранул, капсульованих органічною оболонкою та гранул пористої аміачної селітри), які передані потенційним замовникам (ДНДІ ХП, ТОВ "Аграрник", ТОВ «Е.М.А.»). В рамках проведення спільних науково-дослідних та дослідно-конструкторських робіт і впровадження їх результатів у виробництво на матеріально-технічній базі ПАТ УКРХІМПРОЕКТ в науково-навчальному Центрі комплексного інжинірингу «SSUChemTech» (створений спільно з кафедрою «Процеси та обладнання хімічних і нафтопереробних

виробництв») розпочата серія дослідно-конструкторських робіт з проектування грануляційних установок із застосуванням апаратів з активними гідродинамічними режимами. Результати НДР було впроваджено при виконанні господарчого договору «Наукове обґрунтування вибору оптимального апаратурного оформлення малогабаритної мобільної установки капсулювання мінеральних добрив». Одержано 8 патентів (нові способи гранулювання, обладнання для їх здійснення, промислові зразки грануляторів) та 5 авторських свідоцтв на програмні продукти та методики розрахунків.

Оприлюднення і апробація результатів.

За результатами досліджень опубліковано 22 статті журналах та матеріалах конференцій, що індексуються БД Scopus та/або Web of Science, 1 монографію та 3 розділи монографії у закордонних виданнях мовами Європейського Союзу. Виконавцями НДР захищено 1 кандидатську дисертацію.

ЗМІСТ

Вступ.....	8
1 Підвищення якості гранульованого продукту за рахунок застосування вібраційного впливу.....	14
2 Теоретичні основи розрахунку гідродинамічних умов руху потоків та кінетики зміни температури і маси гранули у вихрових грануляторах.....	30
2.1 Гідродинаміка руху потоків.....	30
2.2 Фізична модель процесів перенесення тепла і маси при гранулюванні.....	36
2.3 Кінетика прогріву та зневоднення гранули.....	41
3 Експериментальні дослідження термо- та гідродинамічних умов роботи вихрових грануляторів. масообмін у вихровому газовому потоці.....	49
3.1 Вплив ступеню закрутки газового потоку на розподіл температур у робочому просторі вихрового гранулятора.....	49
3.2 Визначення часу перебування гранули у вихровому грануляторі в умовах стисненого руху і зміни маси.....	55
3.3 Масообмін в системі «газ-гранула» у вихровому грануляторі.....	59
3.4 Дослідження пристроїв для створення направленного потоку у вихрових грануляторах.....	61
3.5 Режими роботи вихрового гранулятора.....	73
3.6 Дослідження процесів бокового перемішування, циркуляції та класифікації гранул	76
4 Програмна реалізація розрахунків.....	80
5 Основні методи утилізації відходів виробництва аміачної селітри.....	93
5.1 Короткий огляд методів.....	93
5.2 Застосування вихрових потоків при гранулюванні, класифікація і сепарація гранул.....	94
5.3 Застосування вихрових масообмінних контактних ступенів.....	99

5.4 Застосування вихрових сепараторів.....	110
5.5 Екологічна оцінка роботи вихрових грануляторів.....	112
6 Одержання гранул пористої аміачної селітри у вихрових грануляторах.....	115
Висновки.....	132
Перелік джерел посилання.....	134

ВСТУП

«Енергетична стратегія України в період до 2030 року» передбачає підвищення ефективності використання енергетичних ресурсів, економію палива та енергії і забезпечення на основі цих заходів значного зниження енергоємності виробництв хімічної галузі промисловості. Такі завдання обумовлені енергетичною кризою кінця XX – початку XXI століття, а також різким збільшенням вартості матеріалів. Хімічна промисловість України є одним з основних споживачів паливно-енергетичних ресурсів та характеризується низькими коефіцієнтами використання енергії. Перед дослідниками постає проблема розробки нових енергозберігаючих та, особливо, енергоефективних технологій, пов'язаних з розробкою апаратів великої питомої потужності та інтенсивної дії. Актуальним є питання розробки багатофункціональних апаратів суміщеної дії, в яких стає можливим одночасне проведення кількох процесів. В таких апаратах ефективність використання робочого об'єму повинна бути у 2-3 рази вищою, ніж в існуючих аналогах.

Значна кількість галузей хімічної промисловості застосовують гетерогенні процеси, які протікають в системі «газ-рідина-тверде тіло» і займають особливе місце серед інших процесів, адже швидкість їх протікання визначається закономірностями переносу маси і тепла у фазах, які взаємодіють. До таких процесів відносяться різноманітні способи гранулювання. Перспективним напрямом підвищення енергоефективності процесу гранулювання є застосування принципу зваженого (киплячого, псевдозрідженого) шару. Основні переваги такої гідродинамічної системи відзначено в роботах вітчизняних та зарубіжних науковців. Незважаючи на численні переваги, апарати з класичним псевдозрідженим шаром характеризуються рядом недоліків, серед яких виділяють нерівномірність часу перебування дисперсної фази та низьку стабільність шару в широкому діапазоні зміни навантажень по рідкій, твердій і газовій фазах. Ці

недоліки призводять до зниження інтенсивності тепломасообмінних процесів при гранулюванні.

Серед різноманіття способів інтенсифікації процесів хімічної технології закрутка потоків робочих середовищ є одним з найбільш простих і поширених способів. Це пов'язано з тим, що застосування закручених потоків призводить до поліпшення ефективності тепломасообміну а також вирівнюванню температурних нерівномірностей і стабілізації течій. В грануляторах закручування потоку за допомогою різноманітних пристроїв (завихрювачів) призводить до великомасштабного впливу на всі характеристики поля течії, а, отже, і тепломасообмін. При цьому характерна для закручених течій тривимірність поля швидкості і сумірність тангенціального і осьового компонента швидкості обумовлює формування тривимірного поля тиску з радіальним і поздовжнім градієнтом. Завдяки наявності поперечних складових швидкості - тангенційної і радіальної, посилюється конвективний перенос імпульсу, енергії і маси і змінюється вихрова структура внутрішніх закручених потоків. З цим і пов'язані такі необхідні в технічних додатках властивості закручених течій, що виражаються в їх здатності інтенсифікувати процеси тепломасообміну, вирівнювати локальні температурні неоднорідності за рахунок конвективного перемішування.

В теперішній час практично відсутні відомості про механізм руху, структуру, гідродинаміку та тепломасообмін у вихровому зваженому шарі при проведенні гранулювання, які б лягли в основу методики інженерного розрахунку обладнання такого типу. Необхідність проведення досліджень з метою створення математичних моделей гідродинаміки і тепломасообміну у вихрових потоках при гранулюванні, створення методів розрахунку та нових високоефективних конструкцій вихрових грануляторів визначають актуальність цієї роботи.

Виробництво товарних форм гранульованих добрив, їх модифікація і капсулювання здійснюється двома способами: приліплюванням та гранулюванням у

зваженому шарі. Обладнання для отримання продукції цими способами має значну матеріалоємність та низькі показники енергетичної та екологічної ефективності, характеризується недостатньою технологічною гнучкістю. Додатковий інтерес також представляє розробка багатоступневих 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 багатоступневої 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 сушільних 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 багатоступневих полицних 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 багатоступневих сушарок, розробка наукових основ та апаратного оформлення процесу утилізації пилю, 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.

Перелік назв усіх проміжних звітів:

1. Розробка та створення дослідного устаткування вузла гранулювання з вібраційним впливом на струмінь розплаву, проведення випробувань.

2. Розробка та створення дослідного устаткування вузла гранулювання з використанням вихрового гранулятора зваженого шару та багатоступеневого сушіння, проведення випробувань.

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 витіку з отвору гранулятора і дроблення смтруменю 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 $v_\varphi = 0$).

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

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

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

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), $C_1 = p_1$.

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 $F_1(z)$.

$$\begin{aligned} & \frac{\left(-\frac{1}{2} A_1 r^4 z + F_1(z) \right) \left(-2A_1 r^2 z - \frac{-\frac{1}{2} A_1 r^4 z + F_1(z)}{r^2} \right)}{r} = -\frac{1}{\rho} \left(\frac{1}{r^2} \left(\rho \left(\frac{1}{2} A_1^2 r^5 z^4 + A_1 r^4 z^2 A_2 + \right. \right. \right. \\ & \left. \left. \left. + A_1 r^3 z^2 A_3 - 2\nu A_1 r^3 z - \frac{4}{3} \nu A_1 r z^3 - \nu A_2 z \right) \right) - \frac{1}{r} \left(\rho \left(\frac{5}{2} r^4 A_1^2 z^4 + 4A_1 r^3 z^2 A_2 + 3A_1 r^2 z^2 A_3 - \right. \right. \right. \\ & \left. \left. \left. - 6\nu A_1 r^2 z - \frac{4}{3} \nu A_1 z^3 \right) \right) \right) + \nu \left(\frac{1}{r} \frac{d^2 F_1(z)}{dz^2} - 4A_1 r z \right) \end{aligned} \quad (1.9)$$

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

$$\frac{dv_r}{dz} = \frac{-\frac{1}{2} A_1 r^4 z + \frac{dF_1(z)}{dz}}{r}, \quad (1.10)$$

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

$$\frac{1}{2} A_1 r^4 z = \frac{dF_1(z)}{dz} \quad (1.11)$$

Використовуючи граничні умови $F_1(z=0)=0$ і $dz(F_1(z=0))=0$, і поставивши їх в рівняння (1.10) отримуємо значення функції $F_1(z)$ у вигляді полінома:

$$F_1(z) = \frac{1}{6} \frac{(-A_2 + 8A_1 r^3) z^3}{r} + \frac{1}{48} \frac{A_1 r^2 (3A_1 r^4 - 12A_2 r - 8A_3) z^4}{v} \quad (1.12)$$

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:

$$p_0 = -\frac{1}{r_s} \left(\rho \left(\frac{1}{2} A_1^2 r_s^5 z^4 + A_1 r_s^4 z^2 A_2 + A_1 r_s^3 z^2 A_3 - 2v A_1 r_s^3 - \frac{4}{3} v A_1 r_s z^3 - v A_2 z \right) \right) + p_1 \quad (1.14)$$

Звідки:

$$A_2 = -\frac{1}{6} \frac{(r_s (3z^4 A_1^2 \rho \cdot r_s^4 + 6z^2 A_1 \rho \cdot r_s^2 A_3 - 12z A_1 \rho v r_s^2 - 8\rho v A_1 z^3 - 6p_1 + 6p_0))}{\rho z (A_1 r_s^4 z - v)} \quad (1.15)$$

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

$$A_3 = -\frac{1}{6} \frac{3z^4 A_1^2 \rho r_s^4 + 6p_0 - 12z A_1 \rho v r_s^2 - 8\rho v A_1 z^3 - 6p_1}{z^2 r_s^2 \rho A_1} \quad (1.16)$$

З урахування цього:

$$v_z = A_1 r^2 z^2 - \frac{1}{6} \frac{3z^4 A_1^2 \rho r_s^4 + 6p_0 - 12zA_1 \rho v r_s^2 - 8\rho v A_1 z^3 - 6p_1}{z^2 r_s^2 \rho A_1} \quad (1.17)$$

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).

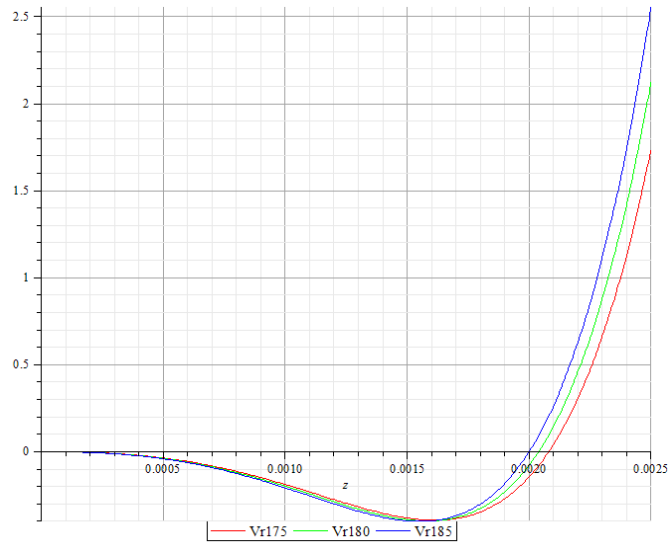


Рисунок 1.1 – Залежність зміни радіальної складової швидкості витікання розплаву аміачної селітри з отвору діаметром 1,3 мм при різних температурах (в'язкості) розплаву при $T=175^{\circ}\text{C}$, $T=180^{\circ}\text{C}$, $T=185^{\circ}\text{C}$

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.

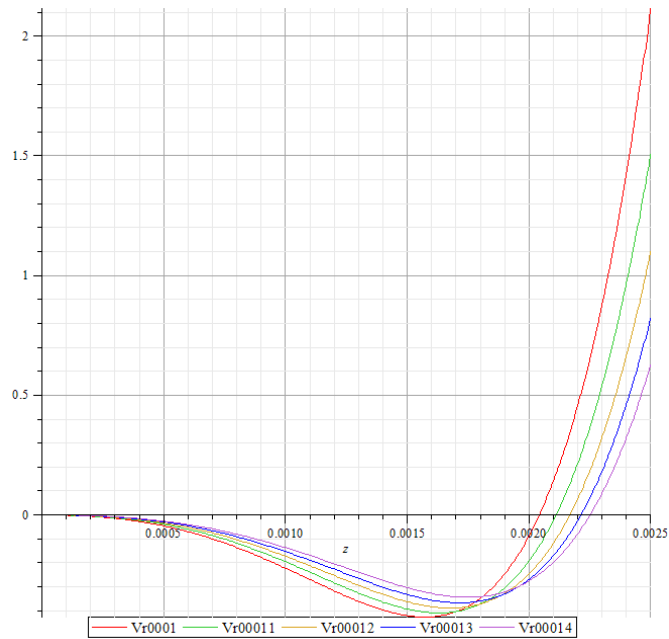


Рисунок 1.2 – Зміна радіальної складової швидкості витікання розплаву аміачної селітри з отворів різного діаметра: 1,0мм, 1,1мм, 1,2мм, 1,3мм, 1,4мм

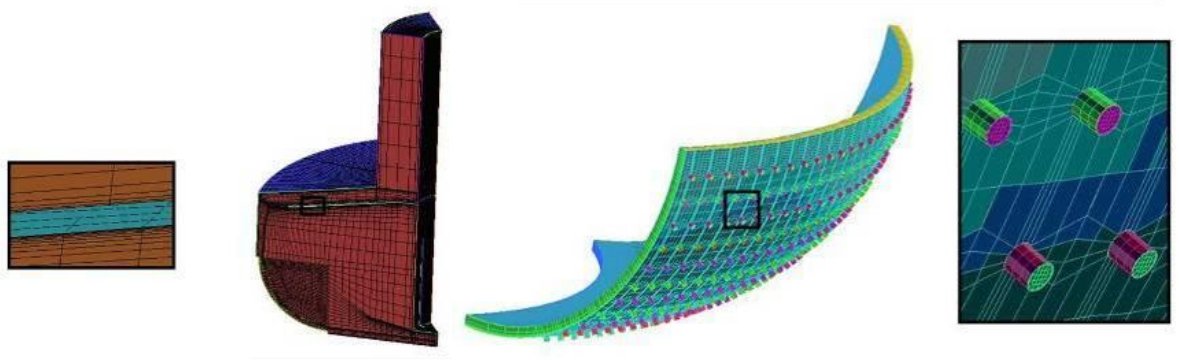


Рисунок 1.3 – Модель гранулятора і розрахункова сітка для комп'ютерного моделювання

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].

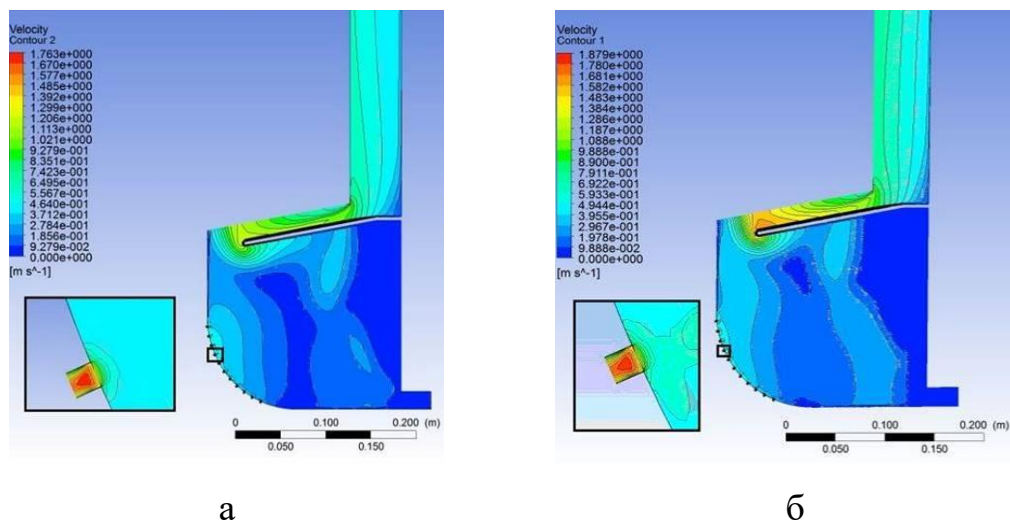
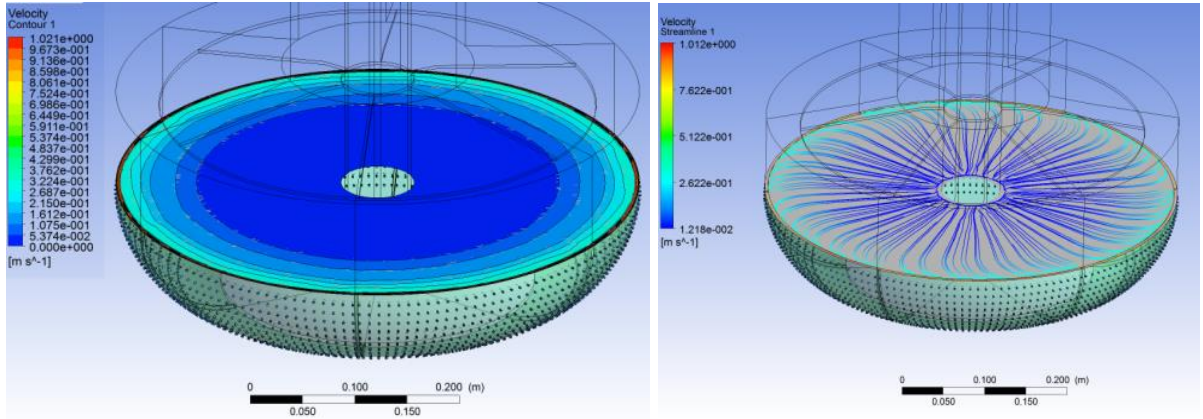


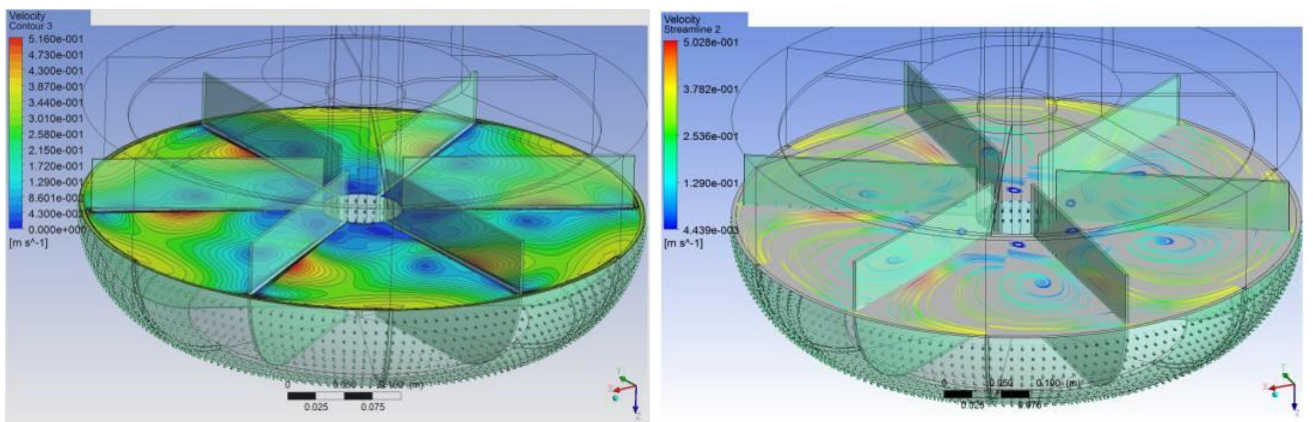
Рисунок 1.4 – Поля швидкостей обертового гранулятора з 6 прямими лопатками (а) і 7 прямими лопатками (б) при швидкості обертання гранулятора 50 об/хв

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

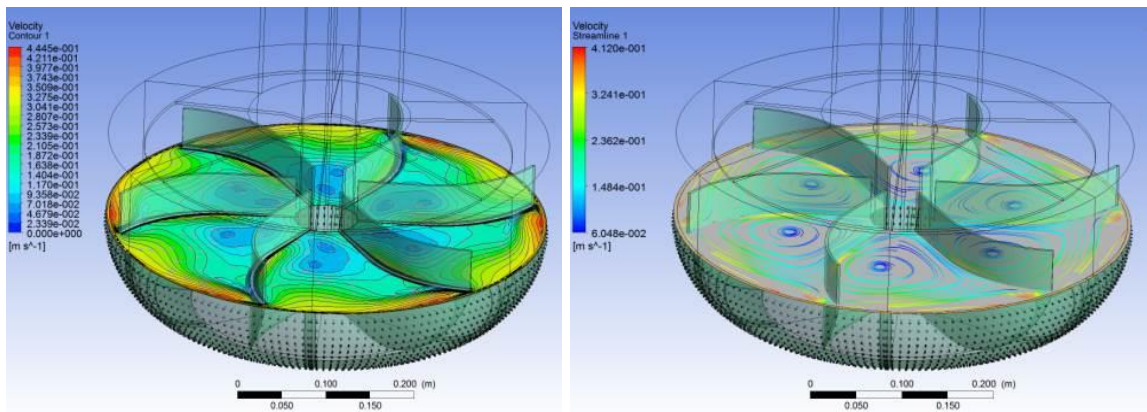
Проведений теоретичний опис процесу диспергування розплаву з перфорованих обертових оболонок на основі розробленої математичної моделі та комп'ютерне моделювання гідродинаміки руху рідини в корпусі гранулятора дозволило удосконалити конструкцію обертового гранулятора (диспергатора) з метою стабілізації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

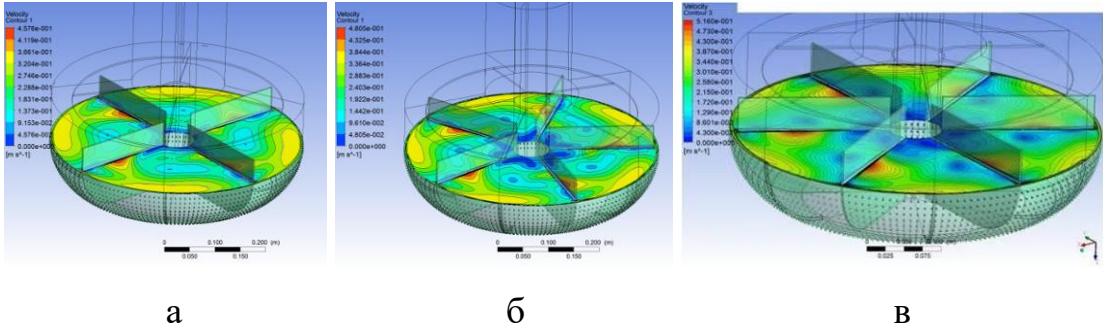


Рисунок 1.6 – Поля швидкостей обертового гранулятора з 4 прямими лопатками (а), 5 прямими лопатками (б), 6 прямими лопатками (в) при швидкості обертання гранулятора 50 об / хв

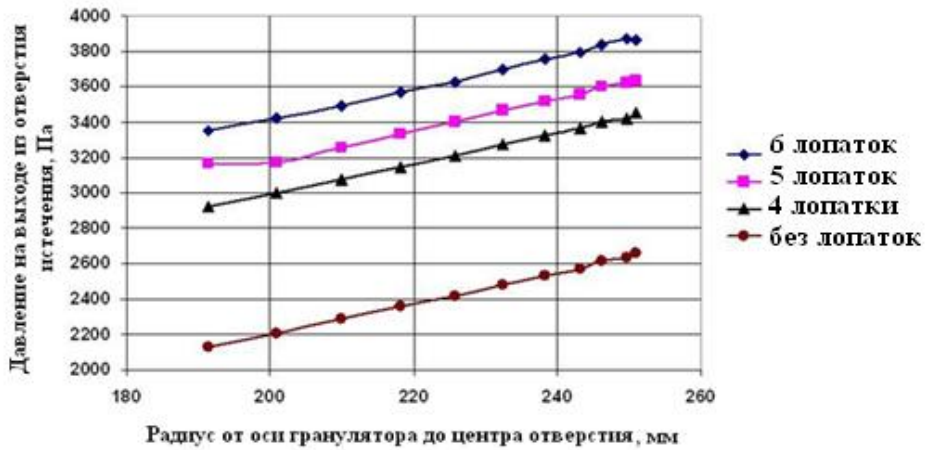


Рисунок 1.7 – Залежність тиску на виході з отворів гранулятора від радіуса розташування отвори (прямі лопатки) при швидкості обертання 50 об/хв

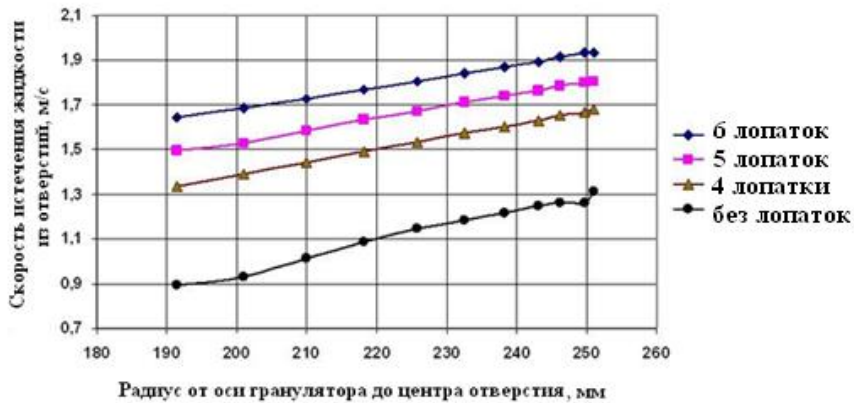


Рисунок 1.8 – Залежність швидкості витікання рідини з отворів гранулятора від радіуса розташування отворів (прямі лопатки) при різній кількості лопаток і швидкості обертання 50 об/хв

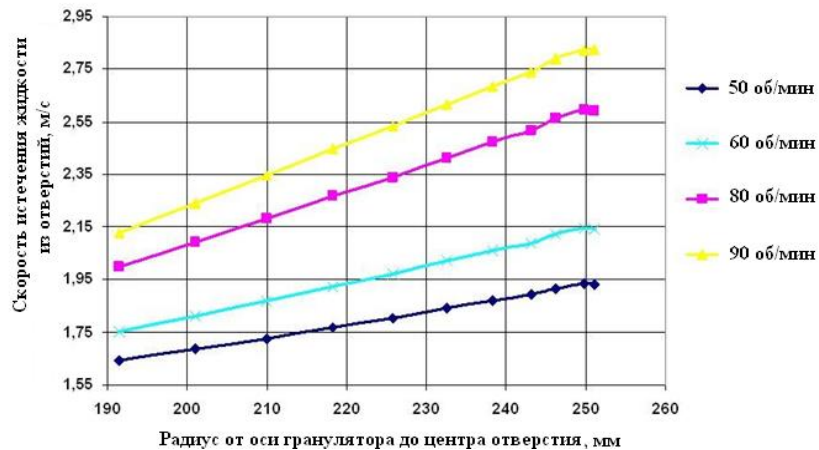


Рисунок 1.9 – Залежність швидкості витікання рідини з отворів гранулятора з 6 прямими лопатками від радіуса розташування отворів при різних швидкостях обертання

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).

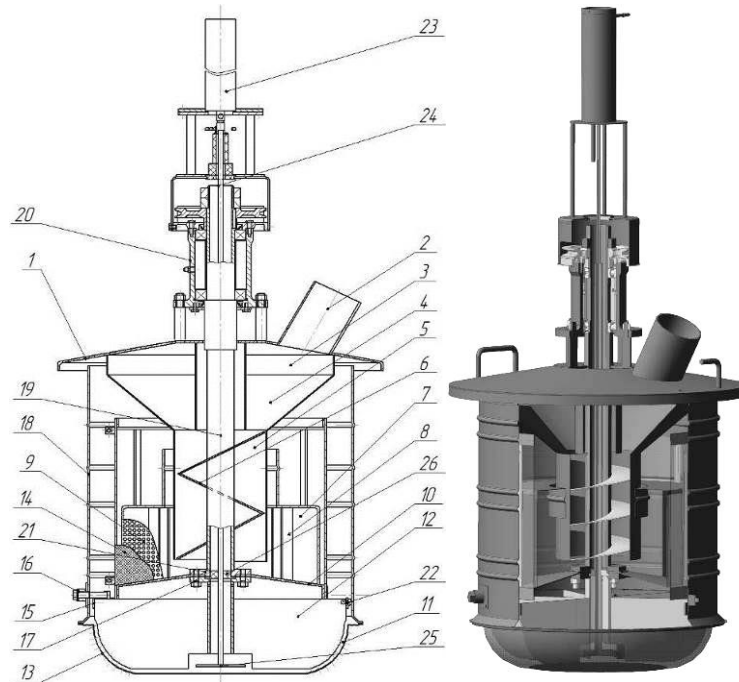


Рисунок 1.10 – Обертовий віброгранулятор розчинів (розплавів) [9]: 1 - корпус;
 2 - патрубок для введення розчину (розплаву); 3 - кільцевий колектор;
 4 - зворотній конус; 5 - кільцевий канал; 6 - шнек; 7 - розподільник розчину
 (розплаву); 8 - направляючі лопатки; 9 - перфорований циліндр;
 10 - направляючий 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).

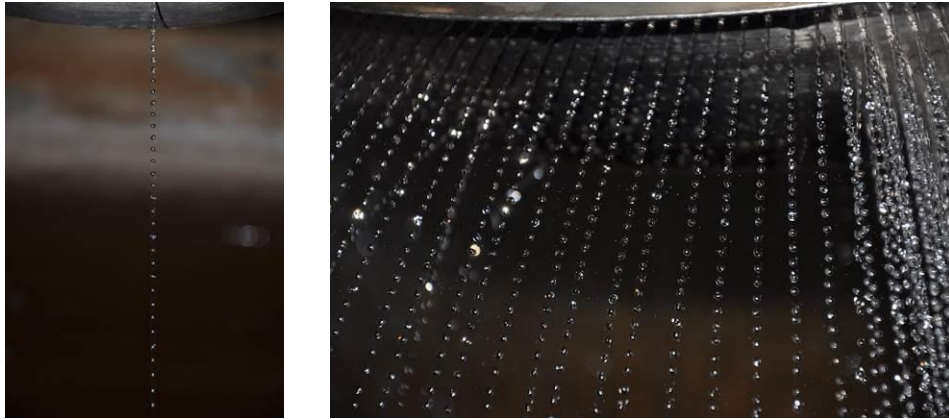


Рисунок 1.11 – Розпад струменя на краплі після витікання з перфорованої оболонки

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).

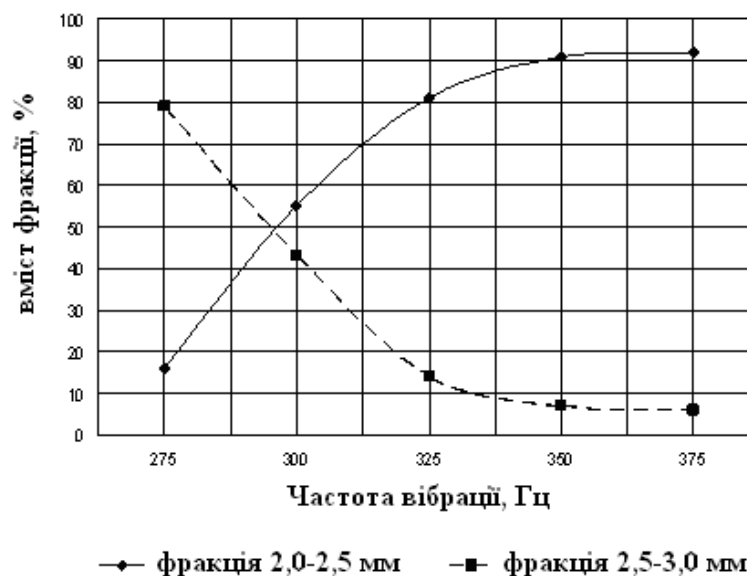


Рисунок 1.12 – Залежність діаметра гранул аміачної селітри від частоти вібрації при швидкості обертання корзини гранулятора $n=60$ об/хв та навантаженні по розплаву 37 т/год

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

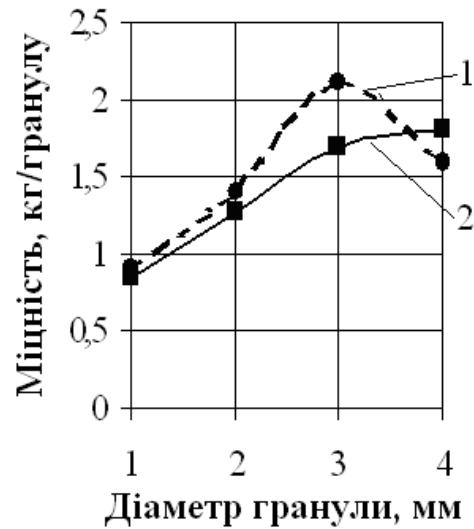


Рисунок 1.13 – Залежність міцності гранул від діаметра: 1 - модифікований диспергатор з електромагнітною вібрисистемою; 2 - статичний диспергатор конструкції НДІХІММАШ з акустичною вібрисистемою

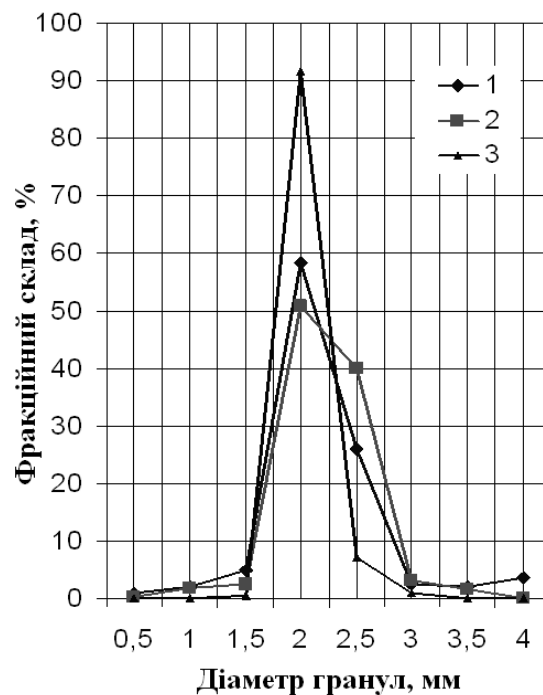


Рисунок 1.14 – Фракційний склад гранул аміачної селітри: 1 - модифікований гранулятор типу ВВГ без накладення вібрації; 2 - гранулятори типу ВВГ інших виробників; 3 - модифікований гранулятор ВВГ

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.

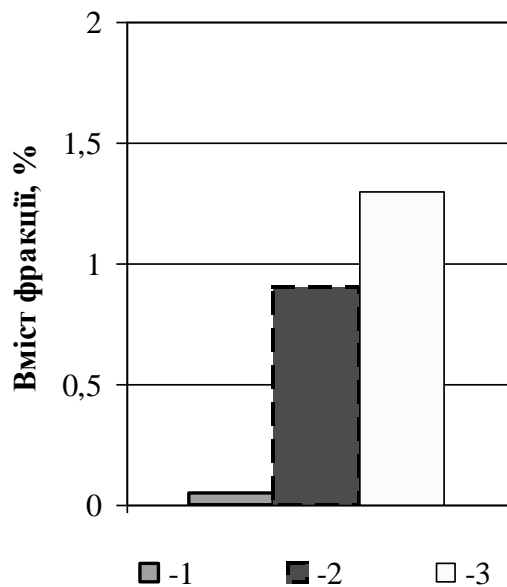


Рисунок 1.15 – Масова частка гранул розміром менше 1,0 мм в готовому продукті: 1 - модифікований гранулятор типу ВВГ; 2 - гранулятори типу ВВГ до модифікації; 3 - статичний гранулятор конструкції НДІХІММАШ

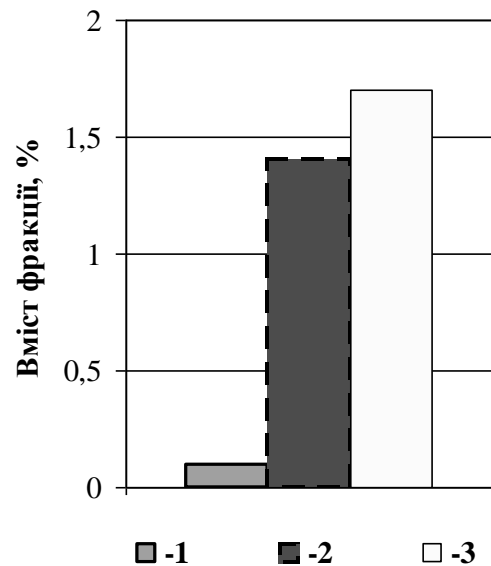


Рисунок 1.16 – Масова частка гранул розміром більше 4,0 мм в готовому продукті: 1 - модифікований гранулятор типу ВВГ; 2 - гранулятори типу ВВГ до модифікації; 3 - статичний гранулятор конструкції НДІХІММАШ

2 ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ РОЗРАХУНКУ ГІДРОДИНАМІЧНИХ УМОВ РУХУ ПОТОКІВ ТА КІНЕТИКИ ЗМІНИ ТЕМПЕРАТУРИ І МАСИ ГРАНУЛИ У ВИХРОВИХ ГРАНУЛЯТОРАХ

2.1 Гідродинаміка руху потоків

Безпосереднє моделювання турбулентних течій шляхом кількісного рішення рівнянь Нав'є-Стокса, записаних для миттєвих швидкостей, на сьогодні є невіршеним завданням. Однак для вирішення окремих завдань стає можливе застосування цього фундаментального рівняння гідродинаміки при виконанні ряду умов:

- а) робота з усередненими по часу значеннями швидкостей при моделюванні турбулентних течій;
- б) вибір системи координат, максимально задовольняє конкретного випадку і полегшує запис рівнянь.

Для проведення моделювання вирішувати зазначені рівняння зручно числовими методами (DEM - Discrete Element Method), визначаючи замість безперервного рішення дискретний набір шуканих значень в певному місці (осередку, вузлі сітки) просторі (при стаціонарному режимі руху потоків). Для досягнення максимальної точності рішення вибирається такий спосіб представлення дискретних значень, яка з цього приводу дискретизації відповідає аналогам алгебраїчних рівнянь. В результаті математичну задачу рішення системи диференціальних або інтегральних рівнянь можна звести до задачі розв'язання системи алгебраїчних рівнянь.

На практиці використовуються різні моделі чисельного рішення класичних рівнянь гідродинаміки для турбулентних течій, які з тих чи іншим успіхом використовуються в різних випадках, мають свої переваги і недоліки [13]: Direct numerical simulation (DNS), Reynolds Averaged Navier-Stokes (RANS), Large Eddy Simulation (LES).

Враховуючи, що на практиці інтерес представляють, як правило, не миттєві, а усереднені за часом значення швидкостей, для математичного опису турбулентного руху закрученого газового потоку використовують рівняння Рейнольдса як модифікацію рівнянь Нав'є-Стокса [14]:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \bar{V}_i) + \frac{\partial}{\partial q_j}(\rho \bar{V}_i \bar{V}_j) + \frac{\partial}{\partial q_j}(\rho \bar{V}_i \bar{V}'_j) = -\frac{\partial p}{\partial q_i} + \frac{\partial}{\partial q_j} \left[\mu \left(\frac{\partial \bar{V}_i}{\partial q_j} + \frac{\partial \bar{V}_j}{\partial q_i} \right) \right] + f_i \quad (2.1)$$

де \bar{V} – усереднені за часом значення швидкостей; \bar{V}' – складові пульсацій швидкостей; μ – коефіцієнт турбулентної в'язкості; t – час; ρ – густина газу; p – тиск; f_i – член, що характеризує дію масових сил; q_j – координатні осі (для випадку моделювання гідродинаміки в робочому об'ємі гранулятора, як показано вище, доцільно використовувати криволінійну систему координат), $i, j = 1 \dots 3$; для циліндричної системи координат (рисунок 2.1) індекс «1» - осьовий напрямок (z), індекс «2» - радіальний напрямок (r), індекс «3» - коловий напрямок (ϕ).

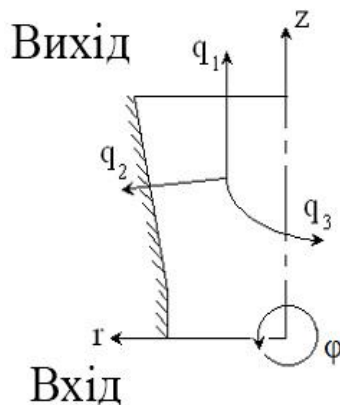


Рисунок 2.1 – Схема робочого простору ВГВС і система координат

Система рівнянь Рейнольдса доповнюється рівнянням нерозривності потоку:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial q_j}(\rho V_j) = 0. \quad (2.2)$$

Основна перевага методу опису і рішення задач гідродинаміки, заснованого на числовому рішенні повних рівнянь Рейнольдса, - точність і універсальність.

Для вирішення рівнянь Рейнольдса (2.1) використовується гіпотеза Бусінеска [15]. Відповідно до цієї гіпотези члени з пульсаціями швидкості $(\rho \overline{V_i V_j'})$ в рівнянні (2.3) пов'язані з усередненими характеристиками потоку таким співвідношенням:

$$\rho \overline{V_i V_j'} = -\mu \left(\frac{\partial \overline{V}_i}{\partial q_j} + \frac{\partial \overline{V}_j}{\partial q_i} \right) + \frac{2}{3} \rho \delta_{ij} k, \quad (2.3)$$

де $k = 0,5 (\overline{V_j V_j'})$ – кінетична енергія турбулентності,

$$\delta_{ij} = 1 \text{ при } i = j,$$

$$\delta_i = 0 \text{ при } i \neq j.$$

Система рівнянь Рейнольдса є еліптичною. Вона застосовується для розрахунку течій в тих випадках, коли характеристики течії в довільній точці області залежать від структури течії як вище, так і нижче по потоку, тобто коли домінуючий напрямок руху рідини є відсутнім або слабо вираженим. Еліптичність системи рівнянь означає, що для її вирішення необхідно ставити граничні умови по всім змінним на всіх кордонах розрахункової області.

У разі моделювання вісесиметричних течій рівняння руху (2.1) і нерозривності потоку (2.2) істотно спрощуються. Для криволінійної (циліндричної) системи координат вони виглядають наступним чином (при введенні в рівняння (2.1) числа Рейнольдса $Re = V_0 D / \nu$ де характерні параметри D – діаметр вхідного перерізу розрахункової області; V_0 – середня витратна швидкість у вхідному перерізі; ν - кінематична в'язкість):

– рівняння Рейнольдса в проекції на осьовий напрямок q_1 :

$$\begin{aligned}
& \frac{V_1}{H_1} \frac{\partial V_1}{\partial q_1} + \frac{V_2}{H_2} \frac{\partial V_1}{\partial q_2} - \frac{V_2^2}{H_1 H_2} \frac{\partial H_2}{\partial q_1} - \frac{V_3^2}{H_1 H_3} \frac{\partial H_3}{\partial q_1} + \frac{1}{H_2} \frac{\partial \left(\overline{V_1' V_2'} \right)}{\partial q_2} + \frac{\left(\overline{V_1' V_2'} \right)}{H_1^2 H_2 H_3} \frac{\partial (H_1^2 H_3)}{\partial q_2} + \\
& + \frac{1}{H_1} \frac{\partial \left(\overline{V_1' V_1'} \right)}{\partial q_1} + \frac{\left(\overline{V_1' V_1'} \right)}{H_1^2 H_2 H_3} \frac{\partial (H_1 H_2 H_3)}{\partial q_1} - \frac{\left(\overline{V_2' V_2'} \right)}{H_1 H_2} \frac{\partial H_2}{\partial q_1} - \frac{\left(\overline{V_3' V_3'} \right)}{H_1 H_3} \frac{\partial H_3}{\partial q_1} = -\frac{1}{H_1} \frac{\partial p}{\partial q_1} + \\
& + \frac{1}{\text{Re}} \left(\frac{1}{H_1^2} \frac{\partial^2 V_1}{\partial q_1^2} + \frac{1}{H_2^2} \frac{\partial^2 V_1}{\partial q_2^2} + \frac{1}{H_1 H_2 H_3} \frac{\partial V_1}{\partial q_1} \frac{\partial (H_2 H_3 / H_1)}{\partial q_1} + \frac{1}{H_1 H_2 H_3} \frac{\partial V_1}{\partial q_2} \frac{\partial (H_1 H_3 / H_2)}{\partial q_2} + \right. \\
& \quad \left. - \frac{2}{H_1 H_2^2} \frac{\partial H_2}{\partial q_1} \frac{\partial V_2}{\partial q_2} + \frac{V_1}{H_1} \frac{\partial}{\partial q_1} \left(\frac{1}{H_1 H_2 H_3} \frac{\partial (H_2 H_3)}{\partial q_1} \right) + \right. \\
& \quad \left. + \frac{V_2}{H_1} \frac{\partial}{\partial q_1} \left(\frac{1}{H_1 H_2 H_3} \frac{\partial (H_1 H_3)}{\partial q_2} \right) - \frac{V_2}{H_2 H_3} \frac{\partial}{\partial q_2} \left(\frac{H_3}{H_1 H_2} \frac{\partial H_2}{\partial q_1} \right) \right); \tag{2.4}
\end{aligned}$$

– рівняння Рейнольдса в проекції на радіальний напрямок q_2 :

$$\begin{aligned}
& \frac{V_1}{H_1} \frac{\partial V_2}{\partial q_1} + \frac{V_2}{H_2} \frac{\partial V_2}{\partial q_2} - \frac{V_1 V_2}{H_1 H_2} \frac{\partial H_2}{\partial q_1} - \frac{V_3^2}{H_2 H_3} \frac{\partial H_3}{\partial q_2} + \frac{1}{H_1} \frac{\partial \left(\overline{V_1' V_2'} \right)}{\partial q_1} + \frac{\left(\overline{V_1' V_2'} \right)}{H_1 H_2^2 H_3} \frac{\partial (H_2^2 H_3)}{\partial q_1} + \\
& + \frac{1}{H_2} \frac{\partial \left(\overline{V_2' V_2'} \right)}{\partial q_2} + \frac{\left(\overline{V_2' V_2'} \right)}{H_1 H_2^2 H_3} \frac{\partial (H_1 H_2 H_3)}{\partial q_2} - \frac{\left(\overline{V_3' V_3'} \right)}{H_2 H_3} \frac{\partial H_3}{\partial q_2} = -\frac{1}{H_2} \frac{\partial p}{\partial q_2} + \\
& + \frac{1}{\text{Re}} \left(\frac{1}{H_1^2} \frac{\partial^2 V_2}{\partial q_1^2} + \frac{1}{H_2^2} \frac{\partial^2 V_2}{\partial q_2^2} + \frac{1}{H_1 H_2 H_3} \frac{\partial V_2}{\partial q_1} \frac{\partial (H_2 H_3 / H_1)}{\partial q_1} + \frac{1}{H_1 H_2 H_3} \frac{\partial V_2}{\partial q_2} \frac{\partial (H_1 H_3 / H_2)}{\partial q_2} + \right. \\
& \quad \left. + \frac{2}{H_1 H_2^2} \frac{\partial H_2}{\partial q_1} \frac{\partial V_1}{\partial q_2} + \frac{V_2}{H_2} \frac{\partial}{\partial q_2} \left(\frac{1}{H_1 H_2 H_3} \frac{\partial (H_1 H_3)}{\partial q_2} \right) \right); \tag{2.5}
\end{aligned}$$

– рівняння Рейнольдса в проекції на коловий напрямок q_3 :

$$\begin{aligned}
& \frac{V_1}{H_1} \frac{\partial V_3}{\partial q_1} + \frac{V_2}{H_2} \frac{\partial V_3}{\partial q_2} + \frac{V_1 V_3}{H_1 H_3} \frac{\partial H_3}{\partial q_1} + \frac{V_2 V_3}{H_2 H_3} \frac{\partial H_3}{\partial q_2} + \frac{1}{H_2} \frac{\partial \left(\overline{V_2' V_3'} \right)}{\partial q_2} + \frac{\left(\overline{V_2' V_3'} \right)}{H_1 H_2 H_3^2} \frac{\partial (H_1 H_3^2)}{\partial q_2} + \\
& + \frac{1}{H_1} \frac{\partial \left(\overline{V_1' V_3'} \right)}{\partial q_1} + \frac{\left(\overline{V_1' V_3'} \right)}{H_1 H_2 H_3^2} \frac{\partial (H_2 H_3^2)}{\partial q_1} = \frac{1}{\text{Re}} \left(\frac{1}{H_1^2} \frac{\partial^2 V_3}{\partial q_1^2} + \frac{1}{H_2^2} \frac{\partial^2 V_3}{\partial q_2^2} + \right. \\
& \left. + \frac{1}{H_1 H_2 H_3} \frac{\partial V_3}{\partial q_1} \frac{\partial (H_2 H_3 / H_1)}{\partial q_1} + \frac{1}{H_1 H_2 H_3} \frac{\partial V_3}{\partial q_2} \frac{\partial (H_1 H_3 / H_2)}{\partial q_2} + \frac{V_3}{H_1 H_2} \frac{\partial}{\partial q_2} \left(\frac{H_1}{H_2 H_3} \frac{\partial H_3}{\partial q_2} \right) \right), \quad (2.6)
\end{aligned}$$

- рівняння нерозривності:

$$\frac{1}{H_1 H_2 H_3} \left(V_1 \frac{\partial (H_2 H_3)}{\partial q_1} + V_2 \frac{\partial (H_3 H_1)}{\partial q_2} \right) + \frac{1}{H_1} \frac{\partial V_1}{\partial q_1} + \frac{1}{H_2} \frac{\partial V_2}{\partial q_2} = 0, \quad (2.7)$$

де H_1, H_2, H_3 – коефіцієнт Ламе [14].

Подальше спрощення системи рівнянь (2.5-2.8) для моделювання вихрового потоку газової фази в робочому просторі гранулятора можливо при використанні таких припущень [16, 17]:

– передбачається наявність домінуючого напрямку течії, уздовж якого осьова складова швидкості газового потоку усюди позитивна і набагато перевищує радіальну;

– складова швидкості руху газового потоку в осьовому напрямку змінюється значно повільніше, ніж в радіальному;

– величини швидкостей і тиску в кожному елементарному обсязі газового потоку залежать тільки від умов нижче по потоку і не залежать від умов вище по потоку.

Ці припущення дозволяють провести аналіз порядків складових в рівняннях (2.4) - (2.7) і відкинути ті з них, які надають помітного впливу на результат розрахунку.

Після обліку припущень для вісесиметричного газового потоку рівняння (2.4) - (2.7) запишуться у вигляді:

$$\begin{aligned} \frac{V_1}{H_1} \frac{\partial V_1}{\partial q_1} + \frac{V_2}{H_2} \frac{\partial V_1}{\partial q_2} - \frac{V_3^2}{H_1 H_3} \frac{\partial H_3}{\partial q_1} + \frac{1}{H_2} \frac{\partial \left(\overline{V_1' V_2'} \right)}{\partial q_2} + \frac{\left(\overline{V_1' V_2'} \right)}{H_1^2 H_2 H_3} \frac{\partial (H_1^2 H_3)}{\partial q_2} = \\ = - \frac{1}{H_1} \frac{\partial p}{\partial q_1} + \frac{1}{\text{Re}} \left(\frac{1}{H_2^2} \frac{\partial^2 V_1}{\partial q_2^2} + \frac{1}{H_1 H_2 H_3} \frac{\partial V_1}{\partial q_2} \frac{\partial (H_1 H_3 / H_2)}{\partial q_2} \right); \end{aligned} \quad (2.8)$$

$$\frac{\partial p_r}{\partial q_2} = \frac{V_3^2}{H_3} \frac{\partial H_3}{\partial q_2}; \quad (2.9)$$

$$\begin{aligned} \frac{V_1}{H_1} \frac{\partial V_3}{\partial q_1} + \frac{V_2}{H_2} \frac{\partial V_3}{\partial q_2} + \frac{V_1 V_3}{H_1 H_3} \frac{\partial H_3}{\partial q_1} + \frac{V_2 V_3}{H_2 H_3} \frac{\partial H_3}{\partial q_2} + \frac{1}{H_2} \frac{\partial \left(\overline{V_2' V_3'} \right)}{\partial q_2} + \frac{\left(\overline{V_2' V_3'} \right)}{H_1 H_2 H_3^2} \frac{\partial (H_1 H_3^2)}{\partial q_2} = \\ = \frac{1}{\text{Re}} \left(\frac{1}{H_2^2} \frac{\partial^2 V_3}{\partial q_2^2} + \frac{1}{H_1 H_2 H_3} \frac{\partial V_3}{\partial q_2} \frac{\partial (H_1 H_3 / H_2)}{\partial q_2} + \frac{V_3}{H_1 H_2} \frac{\partial}{\partial q_2} \left(\frac{H_1}{H_2 H_3} \frac{\partial H_3}{\partial q_2} \right) \right); \end{aligned} \quad (2.10)$$

$$\frac{1}{H_1 H_2 H_3} \left(V_1 \frac{\partial (H_2 H_3)}{\partial q_1} + V_2 \frac{\partial (H_3 H_1)}{\partial q_2} \right) + \frac{1}{H_1} \frac{\partial V_1}{\partial q_1} + \frac{1}{H_2} \frac{\partial V_2}{\partial q_2} = 0. \quad (2.11)$$

Ця система рівнянь замикається рівнянням сталості витрати:

$$\int_0^{Q_2} V_1 H_2 H_3 dq_2 = \text{const}, \quad (2.12)$$

де Q_2 – координата q_2 на стінці робочого об'єму ВГВС.

Отримана система рівнянь (2.8) - (2.12) має параболічний характер, і її рішення базується на методі, запропонованому Патанкармом і Сполдінгом [18-21] і

реалізованому в процедурі SIMPLE (Semi-Implicit Method for Pressure-Linked Equations) і його модифікаціях.

Чисельне рішення рівнянь математичної моделі виконується за один маршовий прохід від вхідного перерізу робочого об'єму до вихідного з використанням методу скінченних об'ємів з елементами кінцево-елементного підходу. Перед виконанням розрахунку будується розрахункова сітка (рис. 2.2), і невідомі значення швидкостей і тиску відшукуються в вузлах цієї сітки.

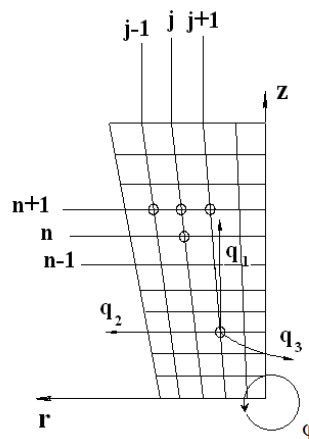


Рисунок 2.2 – Побудова розрахункової сітки

2.2 Фізична модель процесів перенесення тепла і маси при гранулюванні

Отримання пористої аміачної селітри здійснюється наступними методами [22-25]:

1. Введення в розплав (розчин) пороутворюючих і модифікаційних домішок.
2. Термообробка гранул.
3. Зволоження та висушування гранул.

Кожен з цих методів забезпечує необхідну поглинаючу і утримувальну здатність гранул по відношенню до солярного масла; при цьому знижуються екологічні показники гранул (метод 1), відбувається втрата їх міцності (метод 2), ускладнюється схема виробництва (метод 3).

Для отримання якісних промислових вибухових речовин необхідно в основі мати пористу аміачну селітру з рівномірно розподіленою по структурі гранули пористістю, яка забезпечує не тільки високу здатність вбирати масло, але ще і володіє високою утримувальною здатністю, при цьому зберігаючи властивості міцності.

Переваги способу отримання гранул пористої структури в вихровому потоці:

- зменшення часу перебування гранул в об'ємі апарату і збереження їх міцності;

- зменшення циклів термообробки гранул;

- поєднання в одному апараті стадій зволоження і висушування гранул;

В основу способу зволоження гранули з наступною її термообробкою у вихровому газовому потоці покладено процес видалення вологи з матеріалу гранули. Цей процес повинен протікати дуже інтенсивно, щоб влага, яка видаляється під час термообробки у вигляді пари при виході із гранул утворювала пори - розгалужену мережу капілярів [23].

На основі даних досліджень [26-29] є підстави припустити, що об'єм пор буде співрозмірним з об'ємом пари вологи, яка видаляється. Проте слід врахувати, що пари вологи, що видаляються з шарів розташованих ближче до центру гранули, віддалятимуться за межі гранули через пори, що утворилися, які були отримані в наслідок видалення вологи з більш віддалених шарів від центру гранули [30].

У загальному вигляді процес одержання пористої структури можна представити у вигляді послідовності таких стадій:

- насичення (зволоження) гранули рідким наповнювачем. Найпростіший спосіб це зволоження гранул водою. На цій стадії необхідно визначити такі параметри як вологовміст повітря, гранули і необхідний час перебування гранули у вологому середовищі (від цього залежить вологовміст гранул, розподіл вологи уздовж радіуса гранули, показники міцності гранули, при зменшенні яких можливий процес руйнування гранули);

- транспортування вологих гранул у зону видалення вологи - зону формування пористої структури в гранулі;

- видалення гранул із зони формування пористої структури.

Як показують попередні дослідження в області одержання гранул пористої аміачної селітри, термодинамічні й гідродинамічні умови (температура, швидкість газового потоку, час контакту гранул з гарячим газовим (повітряним) середовищем) є основними факторами формування пористої структури. Крім того, після видалення основної кількості вологи й утворення пор, гранулу необхідно певний час піддати процесу сушіння для забезпечення необхідної міцності гранул. В іншому випадку гранули можуть істотно втратити свою міцність.

Таким чином, у розрахунках необхідно передбачити опис кінетики прогріву гранули і визначення мінімального часу її сушіння, значення якого по своїй величині, звичайно, перевищує час, який потрібний на прогрів гранули до необхідної температури.

Гранула являє собою кулясте тіло з порами (рисунок 2.3), характерним розміром якого є радіус “ R ” і з погляду врахування фізико-хімічних властивостей у розрахунках - склад речовини гранули (у тому числі, як головний показник, вологовміст).

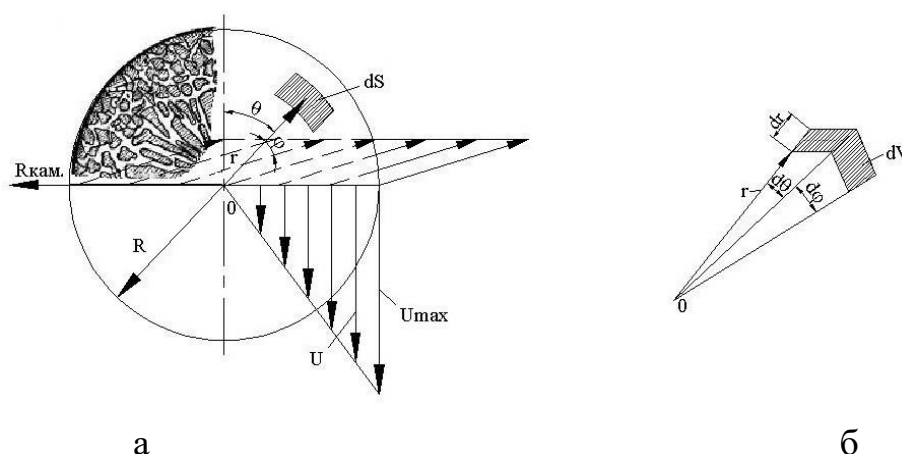


Рисунок 2.3 – Схема розподілу вологи в гранулі й вплив газового потоку на гранулу: а - основні геометричні параметри гранули; б - до визначення величини елемента об'єму d усередині гранули

З метою опису впливу термодинамічних параметрів потоку газу на зволожену гранулу розроблена фізична модель в основу якої покладені наступні припущення:

- для всієї сукупності гранул, що перебувають у робочій зоні певний обраний діаметр гранул є визначальним, тобто формування пористої структури гранул, які мають зоні певний обраний діаметр, переважно визначає пористу структуру всього потоку гранул;

- гранула обмивається потоком газу (повітря), що має постійну температуру. З цього твердження з достатнім ступенем точності можна припустити, що температура поверхні гранули протягом всього часу перебування в робочій зоні буде постійною;

- у зв'язку з тим, що гранула має малі розміри від 1 мм до 4 мм, а переважну частину гранул, що одержуються на азотних підприємствах, складають гранули розміром від 2 мм до 3 мм, можна припустити, що у зв'язку з гігроскопічністю гранул процес зволоження гранул необхідно зводити до мінімуму, що дозволяє припустити, що насичення вологою відбувається за лінійним законом уздовж радіуса;

- пороутворення починається послідовно від верхнього шару й фронт пороутворення рухається уздовж радіуса гранули до її центра, являючи собою сферичну поверхню;

- волога, що випаровується, безперешкодно видаляється із гранули через утворені пори в попередніх шарах речовини з більшим діаметром, «зовнішніх» шарів (ці шари розташовуються ближче до поверхні гранули) з якого складається гранула;

- співрозмірність об'єму утворених пор у гранулі з об'ємом пари вилученої вологи є причиною того, що утримуюча здатність гранул більше значення вологовмісту.

Виходячи з допущень, що наводяться вище, можна створювати математичну модель для визначення основних гідро- й термодинамічних параметрів, вплив яких на гранулу дозволяє створити в ній пористу структуру.

Важливим аспектом при проектуванні вихрових грануляторів для одержання пористої аміачної селітри є врахування при розрахунках явища стисненого руху гранул. Автори [30-35] пропонують враховувати умови стисненого руху при обрахунку часу перебування частинок в робочому просторі пристрою

$$\tau_{cm} = \tau f_{er}(\psi), \quad (2.13)$$

де τ_{cm} - швидкість стисненого руху частинок дисперсної фази;

τ - швидкість руху одиночної частинки;

$f_{er}(\psi)$ - емпірична функція впливу стисненості на час перебування частинки в робочому просторі пристрою.

Функція $f_{er}(\psi)$ має вигляд:

$$f_{er}(\psi) = (1 - \psi)^{-m}, \quad (2.14)$$

де m – емпіричний показник ступеню (коефіцієнт стисненості для обрахунку часу).

На даний час літературні дані щодо визначення емпіричних показника m у формулі (2.14) відповідно для випадку вихрового зваженого шару відсутні. Завдання визначення емпіричних показників також ускладнене через наявність у вихровому зваженому шарі окремих зон за висотою з різною інтенсивністю та переважним напрямом руху гранул.

2.3 Кінетика прогріву та зневоднення гранули

Виходячи з вищевказаних припущень, вважаємо гранулу суцільним кулястим тілом. Розподіл температур у такому тілі описується диференціальним рівнянням [36]:

$$\frac{d}{d\tau}(rT(r,\tau)) = a \left(\frac{d^2}{dr^2}(rT(r,\tau)) \right) \quad (2.15)$$

де r - поточне значення радіуса;

a - коефіцієнт температуропровідності.

Рішенням цього рівняння буде:

$$T(r,\tau) = T_C - (T_C - T_0) \left(\sum_{n=1}^{\infty} \left(\frac{2(\sin(n\pi) - n\pi \cos(n\pi))R \sin\left(\frac{n\pi r}{R}\right) e^{\left(\frac{n^2\pi^2 a\tau}{R^2}\right)}}{(n\pi - \sin(n\pi)\cos(n\pi))n\pi} \right) \right) \quad (1.16)$$

У результаті сушіння діаметр гранули збільшується завдяки модифікаційним переходам і утворенню пористої структури.

На рисунках 2.4–2.7 представлено результати обрахунку кінетики зміни температури гранули за радіусом в певний проміжок часу та температури гранули в заданому часовому діапазоні. Гранули різного діаметру прогриваються з різною інтенсивністю, що дає підстави до визначення загального часу прогріву гранул у полідисперсній системі на рівні максимального часу прогріву для гранули найбільшого діаметра. Зважаючи на те, що, як показали результати експериментальних досліджень, в нижній частині вихрового гранулятора розподіл вологих гранул за розміром має нечіткий характер, рівномірний прогрів всієї полідисперсної системи можливий лише за дотримання вказаного вище часу.

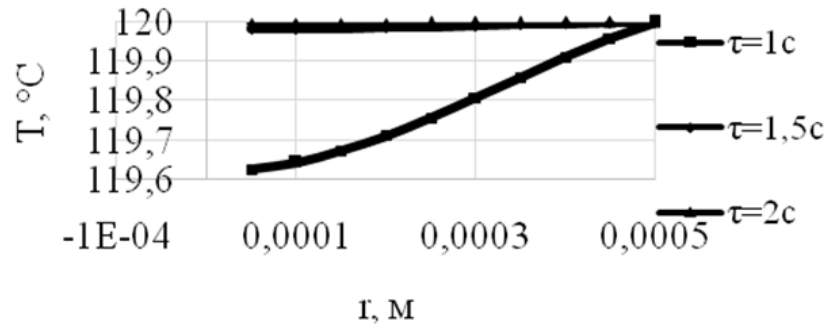


Рисунок 2.4 – Кінетика прогріву гранули аміачної селітри за радіусом при $T_c=120^\circ\text{C}$ $T_0=30^\circ\text{C}$, $d=1$ мм

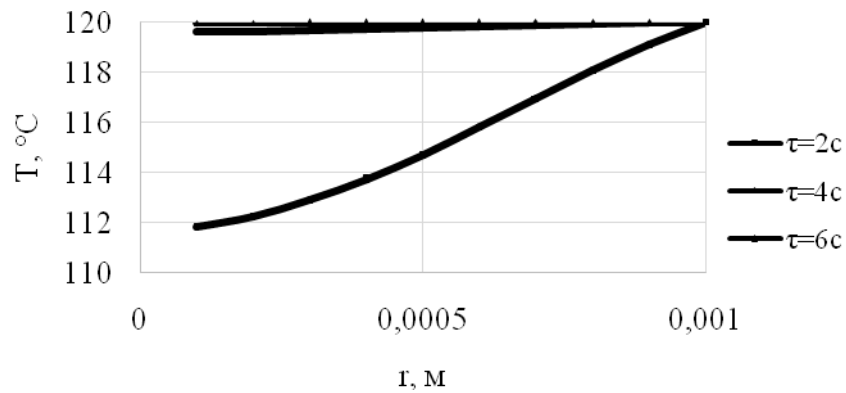


Рисунок 2.5 – Кінетика прогріву гранули аміачної селітри за радіусом при $T_c=120^\circ\text{C}$ $T_0=30^\circ\text{C}$, $d=2$ мм

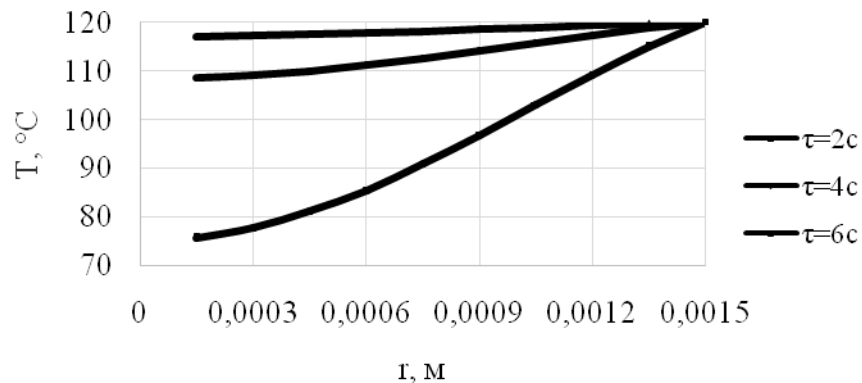
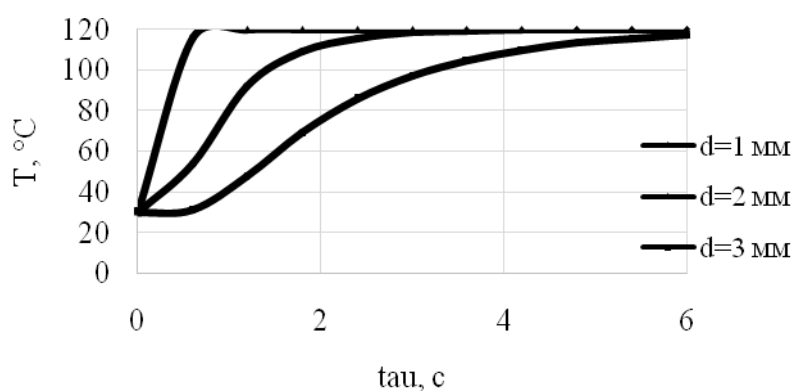
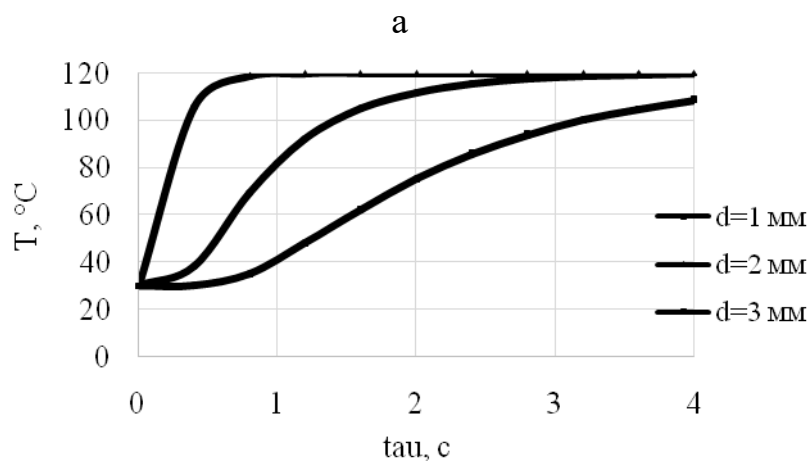
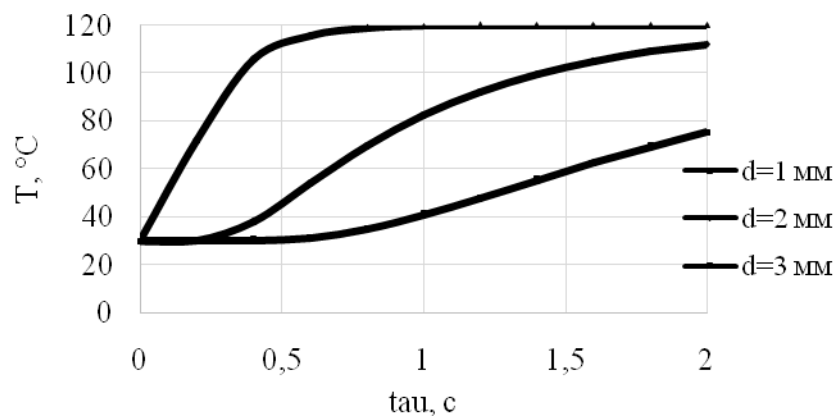


Рисунок 2.6 – Кінетика прогріву гранули аміачної селітри за радіусом при $T_c=120^\circ\text{C}$ $T_0=30^\circ\text{C}$, $d=3$ мм

Представлені розрахунки справедливі для теплоносія з постійною температурою і не враховують вплив температури гранул (наприклад, при

введенні ретур) і рідкої фази (зволожуючого агента), які вводяться в апарат на зміну температури теплоносія.



в

Рисунок 2.7 – Кінетика прогріву гранули аміачної селітри при $T_c = 120^\circ\text{C}$ $T_0 = 30^\circ\text{C}$:
а – $\tau = 2$ с; б – $\tau = 4$ с; в – $\tau = 6$ с

Таким чином гранула буде прогріватись разом з теплоносієм до певної визначеної температури, а лише потім почнеться інтенсивне видалення вологи. Цей фактор збільшує загальний необхідний час перебування гранул в апараті. Розрахунки за наведенню вище математичною моделлю показали, що для повного прогріву гранули з $d=2$ мм від температури 20°C до 120°C в потоці теплоносія з температурою до 120° необхідно 8 секунд.

Якщо проводити поступеневий розрахунок з урахуванням того, що теплоносій при введенні гранул або зволоження охолоджується, то поступовий прогрів гранули до температури 120° буде займати проміжок часу у 3-3,5 разів більший, ніж у попередньому випадку. Результати експериментальних досліджень кінетики прогріву робочого простору вихрового гранулятора за різних умов, що будуть наведені в наступних підрозділах дисертаційної роботи, є підґрунтям для визначення температури теплоносія при поступовому прогріві гранули одночасно з потоком теплоносія.

Одночасно з урахуванням впливу поступового прогріву гранули разом з теплоносієм на загальний час перебування гранули в робочому просторі вихрового тгранулятора необхідно встановити закономірності зміни часу перебування гранули в апараті залежно від умов взаємодії з іншими гранулами (коефіцієнта стисненості частинки f_{er}). Цей показник буде впливати на траєкторію руху гранули в кожній зоні гранулятора та на загальний час її перебування в робочому просторі гранулятора [37]. Визначенню часу перебування гранули в апараті залежно від величини стисненості руху за умов зміни її маси під час видалення вологи буде представлено в окремому підрозділі дисертаційної роботи.

Виходячи зі схеми [38, 39] і величини dm сухої речовини, вага елементарного об'єму dV гранули з урахуванням наявності вологи дорівнює:

$$dm = \rho_{2p}(1+U(r,\tau))_r^2 \sin \theta d\theta d\phi dr, \quad (1.17)$$

де $dV = r^2 \sin \theta d\theta d\phi dr$ - величина елементарного об'єму [26].

З іншого боку, маса «сухої» гранули радіусом R у загальному випадку дорівнює:

$$M_{sr} = 2 \int_0^R \int_0^\pi \int_0^{2\pi} \rho_{2p} r^2 \sin(\Theta) d\Theta d\phi dr, \quad (2.18)$$

або після інтегрування:

$$M_s = \frac{4}{3} \cdot \rho_{2p} \cdot \pi \cdot R^3. \quad (2.19)$$

З урахуванням, що U є функцією від r і часу сушіння τ

$$Mg_{n=\infty}(\tau) = \frac{4}{3} \rho_2 \times \left(1 + \frac{\int_0^R U_p + (U_0 - U_p) \sum_{n=1}^{\infty} \left(\frac{2(\sin(n\pi) - n\pi \cos(n\pi)) R \sin\left(\frac{n\pi r}{R}\right) e^{\left(-\frac{n\pi m \tau}{R}\right)}}{(n\pi - \sin(n\pi) \cos(n\pi)) r n \pi} \right) dr}{R} \right) \pi R^3 \quad (2.20)$$

де m - коефіцієнт дифузії.

Крім цього, у вищенаведеному рівнянні враховувалося, що в кожному момент часу вологовміст у гранулі приймає деяке середнє значення, що обчислюється виходячи із властивостей інтеграла.

Проведені розрахунки показують, що в розв'язанні диференціального рівняння, що описує процес масопередачі в процесі сушіння, визначною є сума

перших двох складових. Подальше обчислення суми призводить до зміни отриманого результату в сьомому знаку дробової частини. На підставі цього висновку є можливість обмежитись обчисленням двох перших коефіцієнтів суми. Таким чином, рівняння для визначення зміни вологості в часі набуває вигляду:

$$U_s(\tau) = \frac{\int_0^R U_p + (U_0 - U_p) \left(\frac{2R \sin\left(\frac{\pi r}{R}\right) e^{\left(\frac{-\pi^2 m \tau}{R^2}\right)} - \frac{R \sin\left(\frac{2\pi r}{R}\right) e^{\left(\frac{-4\pi^2 m \tau}{R^2}\right)}}{\pi r} \right) dr}{R} \quad (2.21)$$

Інтегруючи отриманий вираз, стає можливим отримання залежності для визначення маси гранули в будь-який момент часу в процесі сушіння.

$$Mg(\tau) = \frac{4}{3} \rho_2 \pi R^3 \times \left(1 + \frac{\int_0^R U_p + (U_0 - U_p) \left(\frac{2R \sin\left(\frac{\pi r}{R}\right) e^{\left(\frac{-\pi^2 m \tau}{R^2}\right)} - \frac{R \sin\left(\frac{2\pi r}{R}\right) e^{\left(\frac{-4\pi^2 m \tau}{R^2}\right)}}{\pi r} \right) dr}{R} \right) + 2R \sum_{n=1}^{\infty} \left(\frac{\sin\left(\frac{n\pi r}{R}\right) (-\sin(n\pi) + n\pi \cos(n\pi)) e^{\left(\frac{-n^2 \pi^2 m \tau}{R^2}\right)}}{(n\pi - \sin(n\pi) \cos(n\pi)) n} \right) U_p dr. \quad (2.22)$$

На рисунках 2.8, 2.9 показано кінетику зміни відносної маси гранули аміачної селітри різного діаметра за різних умов зволоження і вимог до вологовмісту кінцевого продукту.

Слід зазначити, що в першому періоді сушіння з постійною швидкістю у зоні інтенсивного вихрового руху гранул видаляється до 60% необхідної вологи.

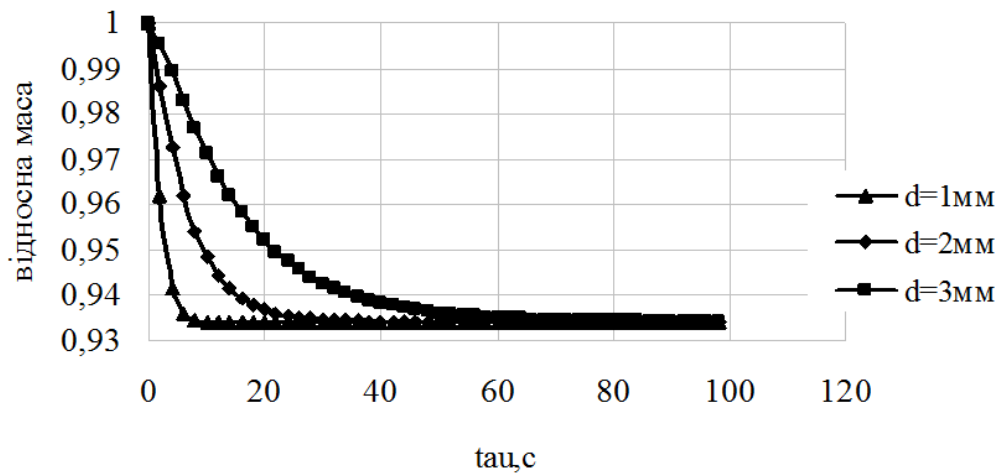


Рисунок 2.8 – Кінетика зміни відносної маси гранули аміачної селітри при $T_c=100^\circ\text{C}$, $U_{\text{ноч}}=0,01$ кг вологи/кг матеріалу, $U_{\text{кін}}=0,003$ вологи/кг матеріалу

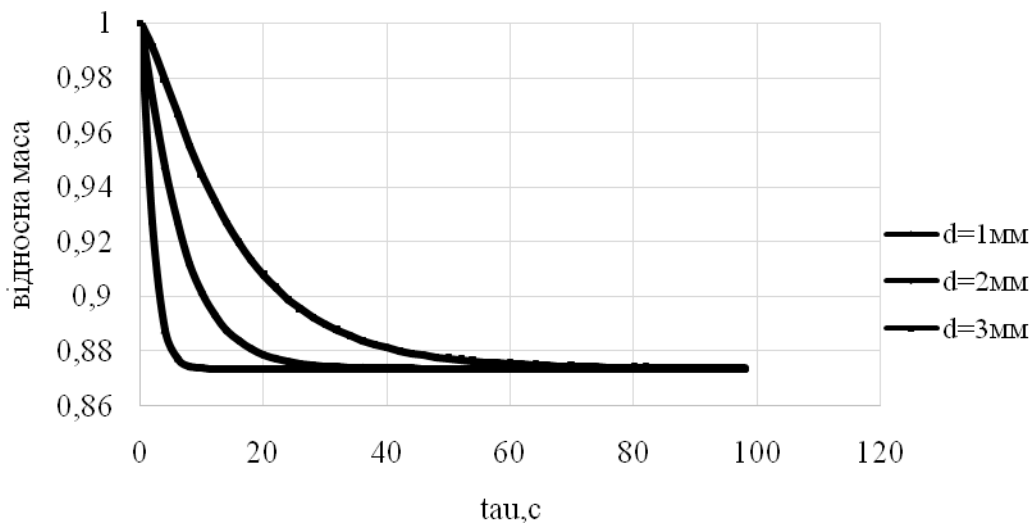


Рисунок 2.9 – Кінетика зміни відносної маси гранули аміачної селітри при $T_c=100^\circ\text{C}$, $U_{\text{ноч}}=0,02$ кг вологи/кг матеріалу, $U_{\text{кін}}=0,001$ вологи/кг матеріалу

Кількість вологи, що залишилась, послідовно видаляється переважно в зоні комбінованого висхідного та вихрового руху гранул. У третій зоні - переважного висхідного руху – волога видаляється незначно, що підтвердили результати експериментальних досліджень залежності ступеню закрутки газового потоку на відносну інтенсивність видалення вологи з гранули, що будуть наведені нижче.

Зміна маси гранули аміачної селітри різного діаметру з початковим і кінцевим вологовмістом $U_{поч}=0,02$ кг вологи/кг матеріалу і $U_{кін}=0,001$ кг вологи/кг матеріалу відповідно представлені на рисунку 2.10.

В умовах зміни маси процес класифікації гранул у робочому просторі вихрового гранулятора сповільнюється внаслідок стисненого руху гранул. Вплив цього явища на загальний час перебування гранул в апараті представлено в наступних розділах дисертаційної роботи.

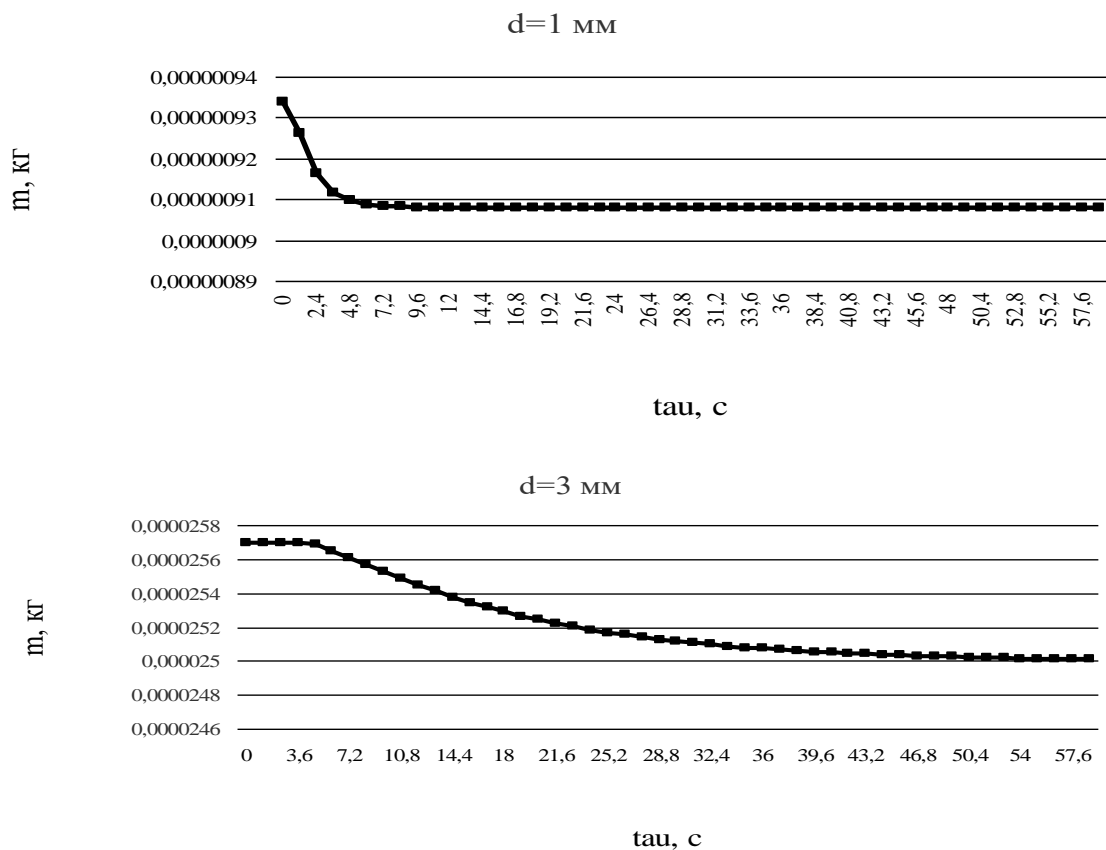


Рисунок 2.10 – Кінетика зміни маси гранули аміачної селітри при $T_c=100^\circ\text{C}$, $U_{поч}=0,02$ кг вологи/кг матеріалу, $U_{кін}=0,001$ вологи/кг матеріалу

3 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕРМО- ТА ГІДРОДИНАМІЧНИХ УМОВ РОБОТИ ВИХРОВИХ ГРАНУЛЯТОРІВ. МАСООБМІН У ВИХРОВОМУ ГАЗОВОМУ ПОТОЦІ

3.1 Вплив ступеню закрутки газového потоку на розподіл температур у робочому просторі вихрового гранулятора

На рисунках 3.1–3.3 показано результати визначення поля температур теплоносія в робочому просторі вихрового гранулятора.

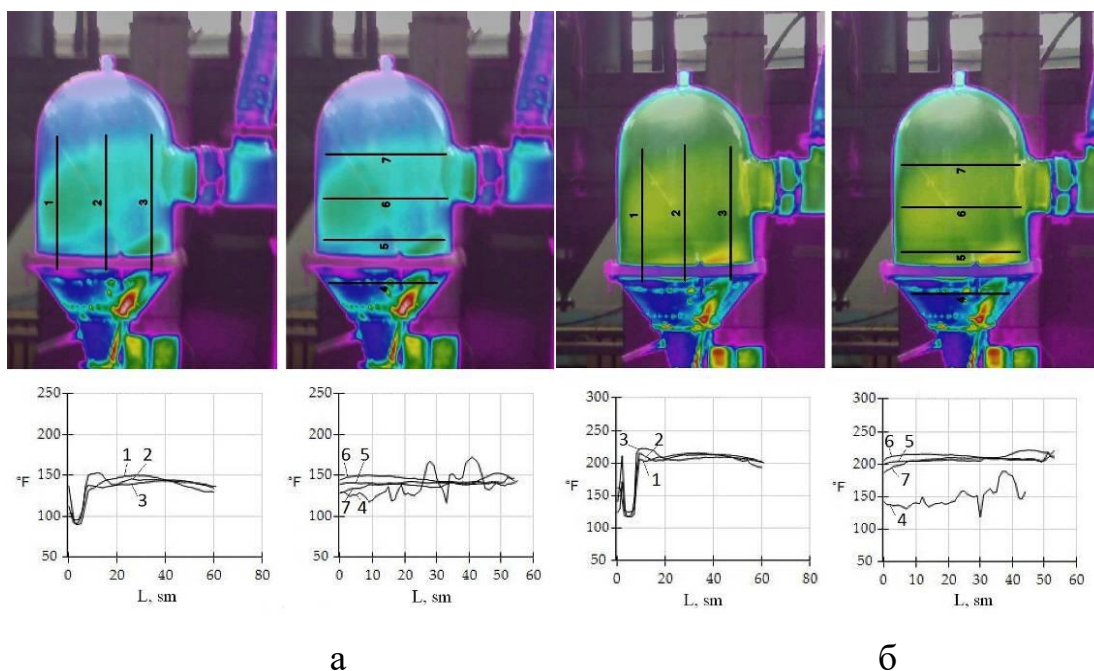


Рисунок 3.1 – Температурний режим роботи вихрового гранулятора (вихід на робочий режим, порожній апарат, однофазна система): а - 4 хвилини з; б - 10 ХВИЛИН

Залежно від ступеню закрутки теплоносія прогрівання окремих зон робочого простору вихрового гранулятора відбувається з різною інтенсивністю. Оцінити розподіл температури теплоносія у вертикальних та горизонтальних перерізах вихрового гранулятора стає можливим за допомогою тепловізійних досліджень. Результати цих досліджень дозволяють визначити мінімальну, максимальну і середню температуру зріджуючого агента, а також температуру теплоносія в

центрі гранулятора у визначений дослідженнями проміжок часу в умовах присутності або відсутності гранул. Такий підхід дозволяє відпрацювати алгоритм керування та з достатнім ступенем точності одержати вихідні дані до кінетичного розрахунку прогріву та зневоднення гранули.

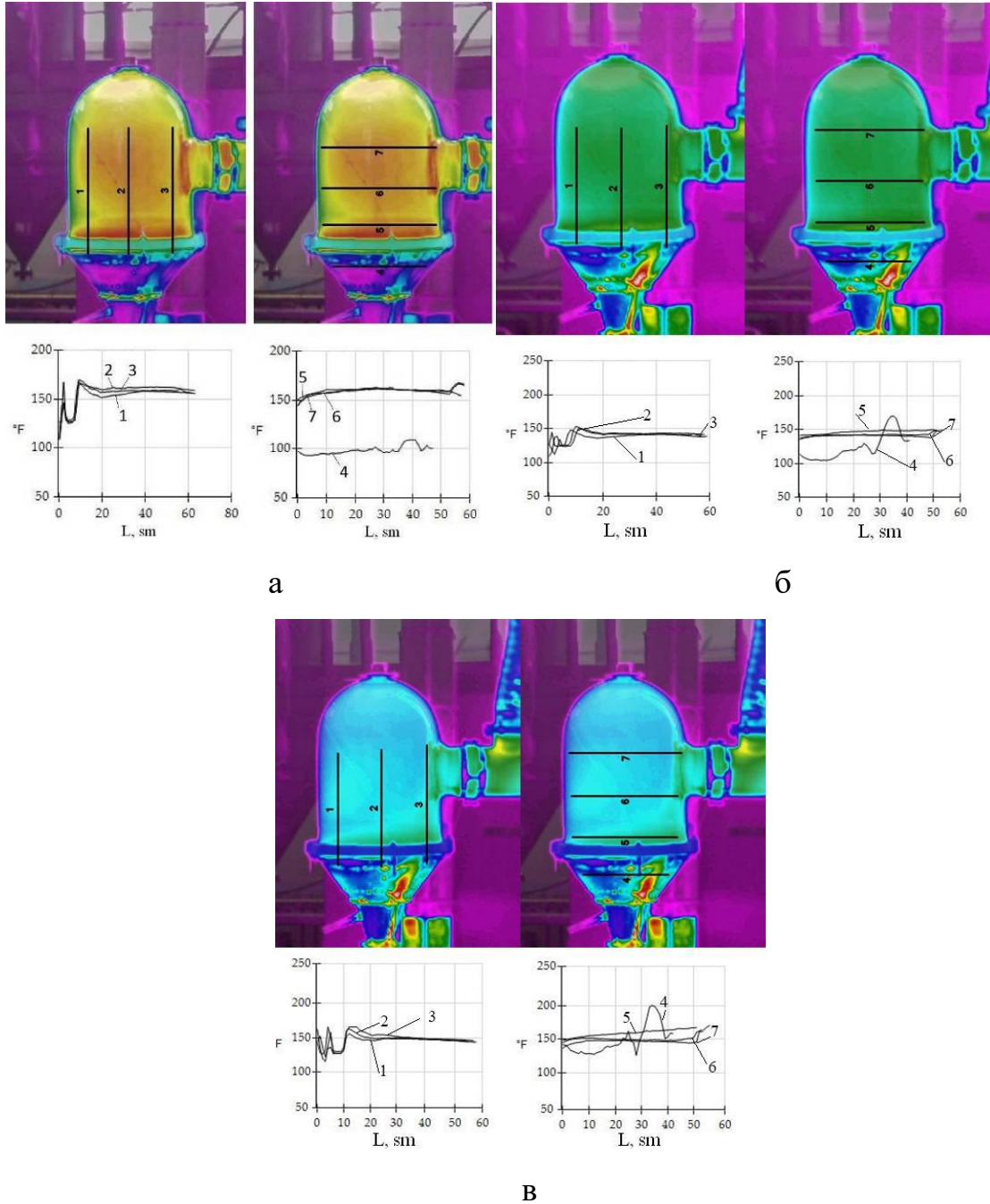


Рисунок 3.2 – Температурний режим роботи вихрового гранулятора (двофазна система «гранули - теплоносій»): а - 6 хвилин; б - 11 хвилин; в - 15 хвилин

Узагальнена картина зміни середньої температури теплоносія подана на рисунку 3.3. За результатами загального аналізу картини розподілу поля температур теплоносія запропоновано два способи сушіння гранул:

- одночасно з нагріванням гарячого теплоносія;
- періодичним введенням для сушіння після повного нагріву гарячого теплоносія і подальшим нагріванням.

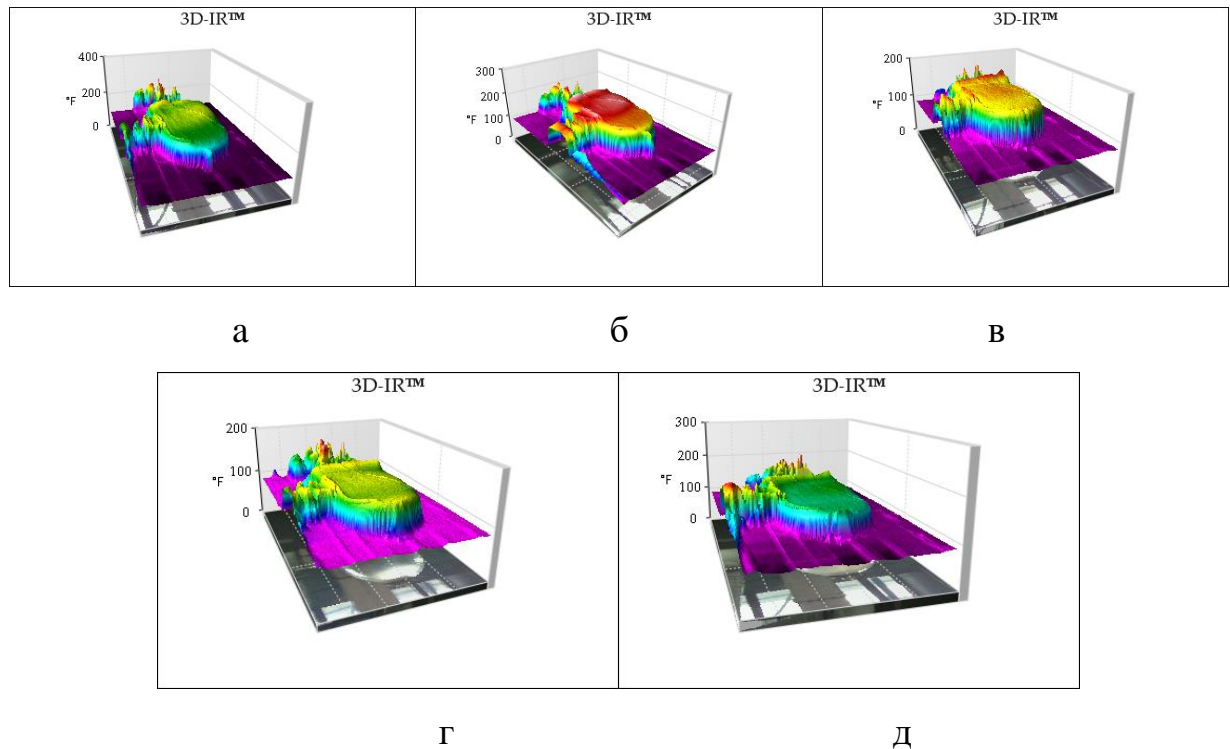
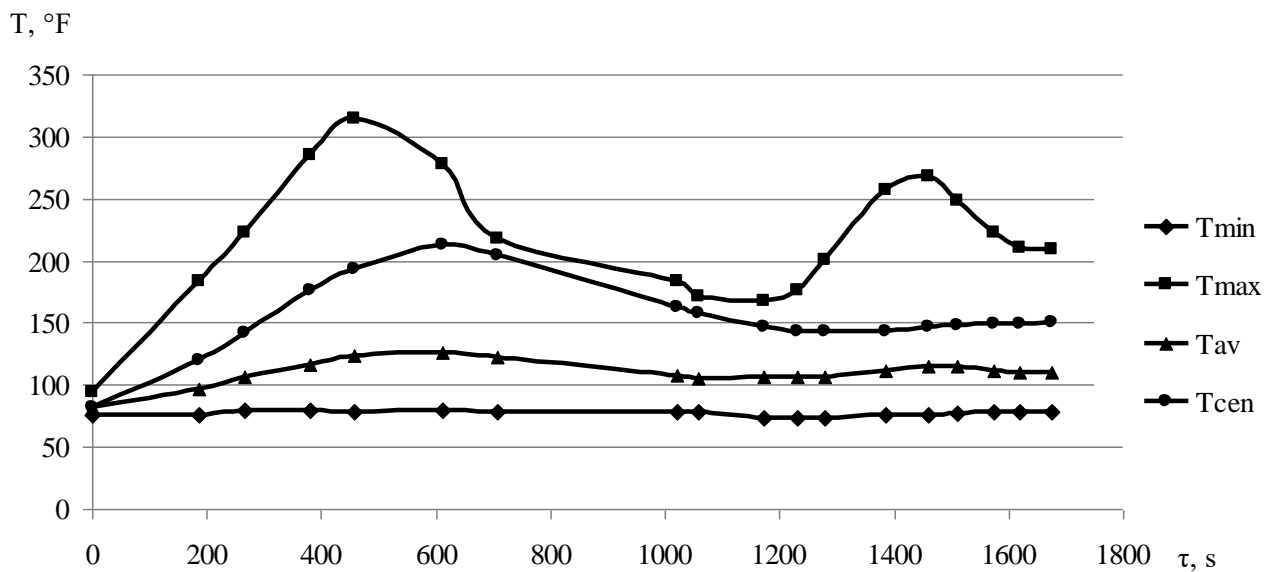


Рисунок 3.3 – Кінетика прогріву робочого простору вихрового гранулятора (двофазна система гранули-газовий потік, відлік часу - з моменту завантаження гранул в вихровий гранулятор) після 1 хвилини (а); 2,5 хвилин (б); 8 хвилин (в); 10, 5 хвилин (г); 18,5 хвилин (д)

У першому випадку прогрівання буде «м'яким» (поступовий прогрів гранули збільшує час її сушіння, але запобігає від руйнуванню ядра). У другому випадку інтенсивність видалення вологи збільшується (різкий нагрів дозволяє зменшити час прогріву гранули, збільшити інтенсивність видалення вологи), але при цьому можливе руйнування ядра. Підбір оптимального термодинамічного режиму роботи гранулятора дозволить провести повне видалення вологи з гранули із збереженням її міцності і утворенням пористого поверхневого шару [40]. При проведенні досліджень використовувався другий метод сушіння.



Рисунок 3.4 – Узагальнена картина зміни середньої температури теплоносія за часом



а

Рисунок 3.5, аркуш 1 – Динаміка зміни температури робочого простору вихрового гранулятора залежно від інтенсивності закрутки зріджуючого агента V_{φ} : а – $V_{\varphi}=5,2 \text{ м/с}$. Температура зріджуючого агента: T_{\min} – мінімальна температура; T_{\max} – максимальна температура; T_{av} – середня температура; T_{cen} – температура в центрі. Час введення гранул – 650 с

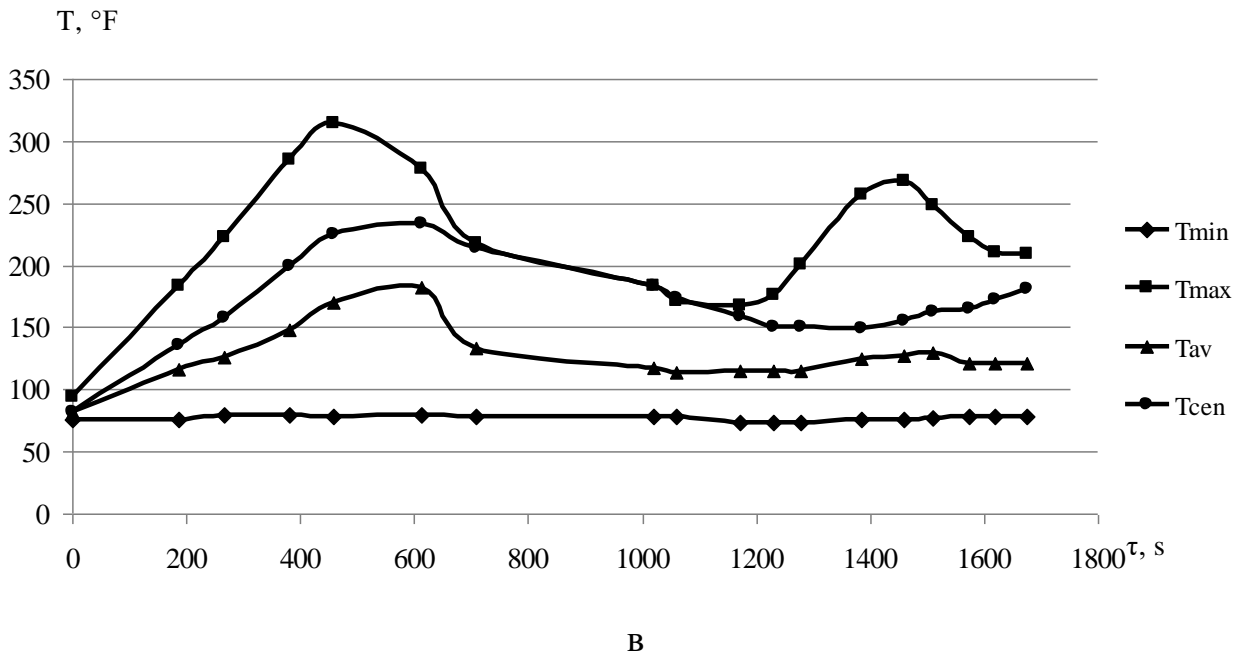
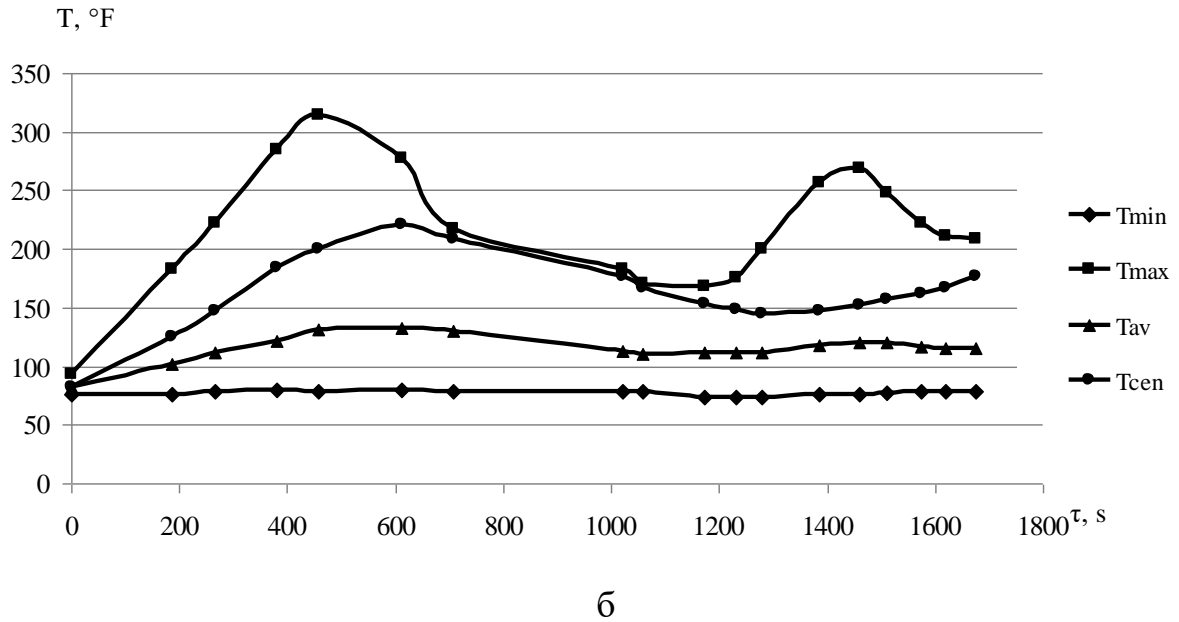


Рисунок 3.5, аркуш 2 – б – $V_\varphi = 6,8 \text{ м/с}$; в – $V_\varphi = 8,1 \text{ м/с}$

Результати експериментальних досліджень показали наступне:

- зміна температурного поля в робочому просторі вихрового гранулятора в часі характеризується двома екстремумами (момент введення гранул в потік

гарячого теплоносія і момент початку одночасного нагрівання гранул і гарячого теплоносія);

- прогрів робочого простору вихрового гранулятора при виході на робочий режим здійснюється нерівномірно з характерними зонами зниженої тем-ператури (з плином часу прогрівання стає більш рівномірним);

- при збільшенні ступеня закрутки підвищується середня температура зріджуючого агента і його температура в центрі апарату;

- у вертикальних перерізах апарату в нижніх шарах зріджуючого агента (після введення гранул - двофазної системи) дещо зменшується температура в центральній області. Це можна пояснити наявністю інтенсивного вихрового руху зріджуючого агента (двофазної системи) в цій зоні.

- в горизонтальних перерізах апарату спостерігається деяке збільшення температури зріджуючого агента (після введення гранул - двофазної системи) внаслідок інтенсивної закрутки потоків;

- після завантаження гранул температура в зоні руху гранул різко падає, інтенсивність подальшого прогріву гранулятора також знижується.

Результати експериментальних досліджень дозволяють визначити температуру теплоносія в робочому просторі вихрового гранулятора в певний проміжок часу і застосувати цей показник для розрахунку кінетики прогріву та зневоднення гранули. Уточнення показника температури теплоносія в грануляторі дозволяє провести розрахунки з визначенням мінімального часу сушіння гранули, щоб уникнути небажаного її перегріву та руйнування ядра. В подальшому за результатами гідродинамічного розрахунку та оцінки умов стисненого руху гранул необхідно визначити оптимальну конструкцію робочого простору гранулятора.

3.2 Визначення часу перебування гранули у вихровому грануляторі в умовах стисненого руху і зміни маси

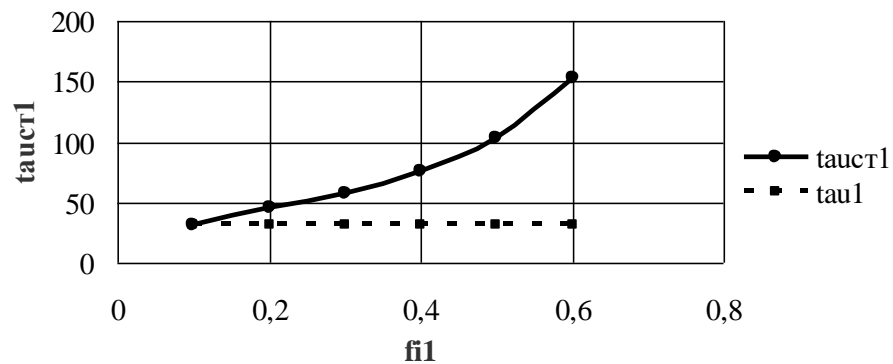
Зважаючи на те, що попередніми дослідженнями показано факт зміни порізності вихрового зваженого шару за висотою, а також наявність трьох характерних зон руху гранул, застосування при розрахунках часу перебування гранул у робочому просторі вихрового гранулятора середнього значення вмісту дисперсної фази в двофазній системі ψ призводить до значної похибки розрахунків часу перебування гранули за формулою (3.13).

Враховуючи те, що на процес зневоднення гранульованого матеріалу повинен відводитись визначений час, введення коефіцієнту стисненості в розрахунки для кожної зони гранулятора та визначення часу перебування гранули для кожної зони гранулятора окремо дозволить досягти оптимальних умов термообробки гранул без їх перегрівання або наявності залишкової, більшої за мінімально необхідну, кількості вологи.

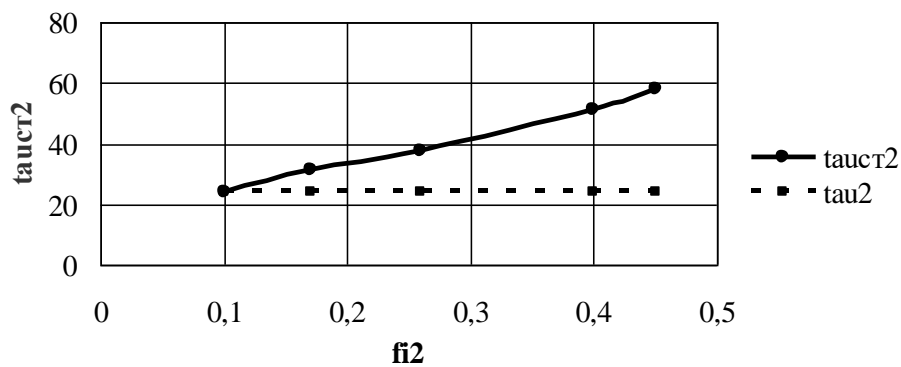
На рисунку 3.6 представлені результати експериментальних досліджень часу перебування гранули з визначеними вологісними параметрами в робочому просторі вихрового гранулятора в режимі вільного ($\psi \leq 0,1$) та стисненого руху. Експериментальні дослідження проводились при застосування газорозподільних пристроїв лопатевого типу.

Збільшення часу перебування гранули у кожній зоні відбувається з різною інтенсивністю, зважаючи на зміну порізності зваженого шару і різний напрям вектору сумарної швидкості руху газового потоку за висотою пристрою. При цьому переважно гранула знаходиться в зоні вихрового руху гранул, яка співпадає з «активною» зоною, де видалається більша частина вологи в режимі постійної швидкості сушіння. У другій та третій зонах гранулятора, де час перебування гранули менший за першу зону 3-5 разів (рисунок 3.7), видалення вологи відбувається в режимі спадаючої швидкості сушіння. Припущення про співпадіння зон руху гранул у вихровому грануляторі з періодами сушіння

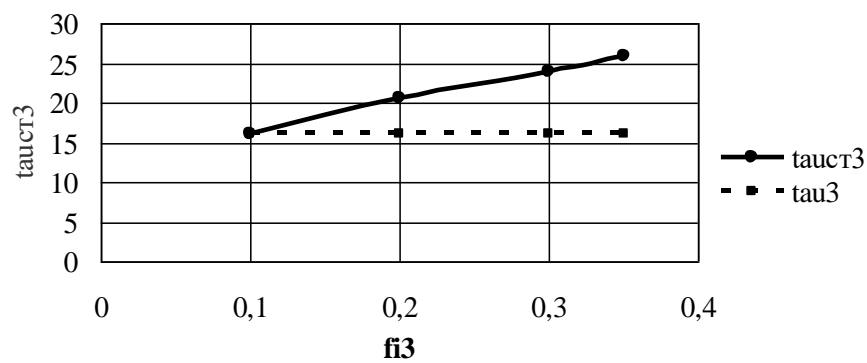
підтверджується результатами визначення швидкості сушіння по висоті пристрою (крива сушіння аміачної селітри представлена на рисунку 3.8).



а



б



в

Рисунок 3.6 – Час перебування гранули аміачної селітри (полідисперсна система, що складається з 75-80% гранул діаметром $d=2-3$ мм) з $U_{ноч}=0,02$ кг вологи/кг матеріалу і $U_{кин}=0,001$ кг вологи/кг матеріалу при $T_c=100^\circ\text{C}$ в окремих зонах гранулятора: а – зона I; б – зона II; в – зона III

У першій зоні видаляється до 60% необхідної вологи, у другій зоні – до 30%, третя зона характеризується повільним видаленням вологи і несе більше гідродинамічну функцію – функцію сепараційної зони і зони відведенні дрібних або легких гранул для здійснення внутрішньої циркуляції ретура.

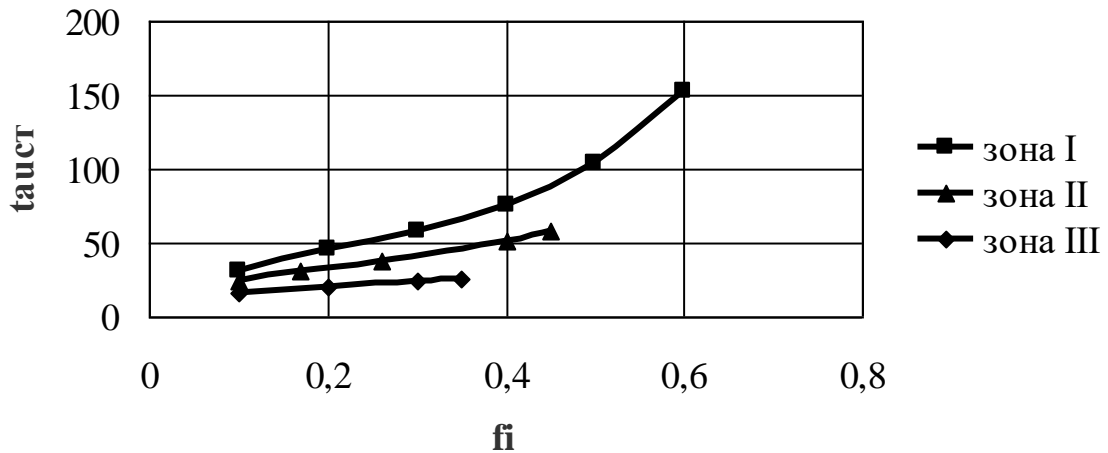


Рисунок 3.7 – Визначення часу перебування гранули в окремих зонах робочого простору вихрового гранулятора

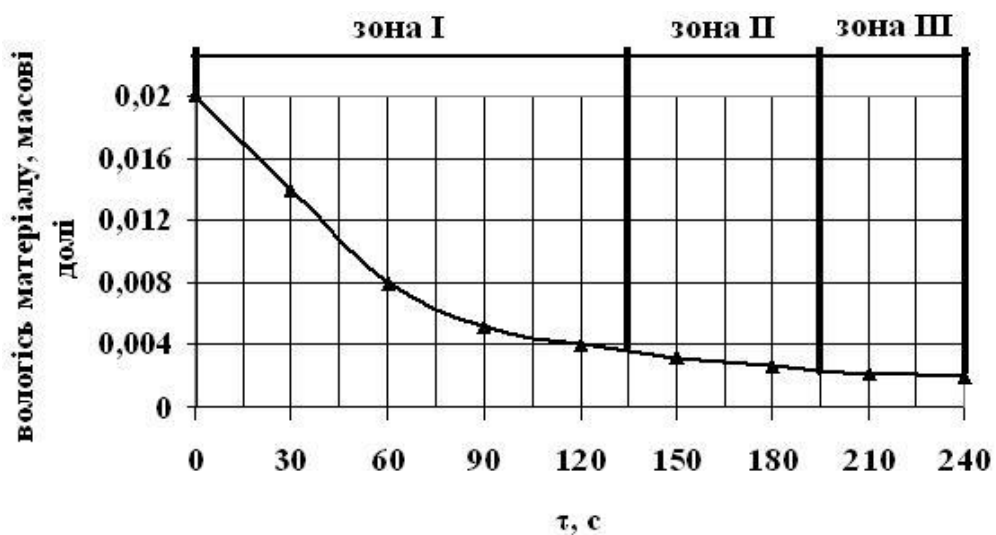


Рисунок 3.8 – Крива сушіння аміачної селітри: $T_c=100^\circ\text{C}$, $U_{\text{поч}}=0,02$ кг вологи/кг матеріалу, $U_{\text{кін}}=0,001$ вологи/кг матеріалу, $d=2$ мм

Аналогічні експериментальні дослідження були проведені для гранул аміачної селітри з різним ступенем полідисперсності (з вмістом від 75 до 95 % гранул діаметром $d=2-3$ мм), $U_{поч}=0,01-0,02$ кг вологи/кг матеріалу і $U_{кін}=0,001-0,003$ кг вологи/кг матеріалу при $T_c=100-120^\circ\text{C}$ в діапазоні кутів розкриття конуса робочого простору гранулятора в межах $\varphi=10-15^\circ$.

За результатами визначення експериментального часу перебування ретура в режимі вільного і стисненого руху при наявному значенні ψ з урахуванням, що відповідно до формули (2.13) $f_{er} = \tau_{cm}/\tau$ коефіцієнт m визначається за формулою

$$m = -\frac{\ln(\tau_{cm}/\tau)}{\ln(1-\psi)}. \quad (3.1)$$

Результати досліджень дали змогу визначити діапазон значень показника m в кожній зоні гранулятора по формулі (3.1):

- зона I – $m=1,7-1,74$;
- зона II – $m=1,46-1,49$;
- зона III – $m=1,1-1,13$.

Таким чином, загальний час перебування гранул в режимі стисненого руху визначиться за формулою:

$$\sum \tau_{cm} = \tau_{cm}^I + \tau_{cm}^{II} + \tau_{cm}^{III} = \tau^I (1-\psi^I)^{-m^I} + \tau^{II} (1-\psi^{II})^{-m^{II}} + \tau^{III} (1-\psi^{III})^{-m^{III}}, \quad (3.2)$$

Де середнє значення ψ в кожній зоні залежить від середньої порізності зваженого шару та визначається за формулою:

$$\psi_i = 1 - \varepsilon_i. \quad (3.3)$$

За даними експериментальних досліджень з визначення оптимальної конструкції газорозподільного пристрою та її впливу на стабільність вихрового зваженого шару запропоновано наступні діапазони середніх значень ψ в кожній зоні вихрового гранулятора, які будуть застосовані в інженерному розрахунку апарата середньої потужності [38-40]:

- зона I – $\psi = 0,48-0,53$;
- зона II – $\psi = 0,35-0,4$;
- зона III – $\psi = 0,2-0,24$.

2.3 Масообмін в системі «газ-гранула» у вихровому грануляторі

Обчислення коефіцієнту масовіддачі (коефіцієнту вологовіддачі) β проведено за рівнянням [41]:

$$\frac{\Delta U}{\tau} = \beta \cdot F \cdot \left(b_k - \frac{b_k + b_0}{2} \right) \cdot \rho_c, \quad (3.4)$$

де b_0 , b_k , ΔU – початкова та кінцева вологість теплоносія, кількість видаленої вологи з гранул відповідно;

F – поверхня масопередачі, яка залежить від продуктивності гранулятора за дисперсним матеріалом, у т.ч. коефіцієнту стисненості і часу перебування гранул в апараті.

Значення b_0 , b_k , ΔU визначаються за результатами експериментальних досліджень, час τ - залежно від визначеного часу перебування в апараті гранули у режимі вільного руху, показника m , визначеного для кожної з зон гранулятора за формулою (3.1) коефіцієнту стисненості, обчисленого за формулою (2.14) та часу руху гранули в умовах стисненого руху, визначеного за формулою (2.13).

Площа поверхні масопередачі F визначається залежно від потужності гранулятора за дисперсною фазою та часу перебування гранули в умовах стисненого руху.

Розраховані значення коефіцієнта масовіддачі β з рівняння (3.4) залежно від швидкості руху теплоносія показано на рисунку 3.9.

У загальному вигляді критеріальне рівняння процесу сушіння можна записати наступним чином:

$$Sh = A_1 \cdot Sc^n \cdot Re^m, \quad (3.5)$$

де A_1 – коефіцієнт рівняння;

d_c^e – еквівалентний діаметр частинки;

m, n – показники ступенів рівняння, які визначаються з графічної залежності $Sh / Sc^{0,33} = f(Re)$, отриманої на основі експериментальних даних (рисунок 3.10).

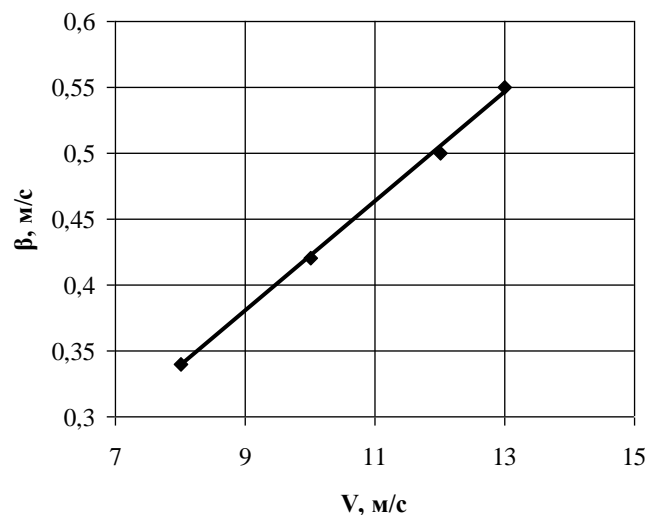


Рисунок 3.9 – Залежність коефіцієнта масовіддачі від швидкості руху сушильного агента

З графічної залежності (Рис. 3.10) коефіцієнт $A_1 = 0,018$, $m = 0,58$. Значення коефіцієнта n дорівнює 0,33 для випадку, коли параметри сушильного агента змінюються упродовж експерименту незначно.

З урахуванням отриманих значень коефіцієнта A_1 та ступеня m критеріальне рівняння (3.5) буде мати вигляд:

$$Sh = 0,018 \cdot Sc^{0,33} \cdot Re^{0,58} \quad (3.6)$$

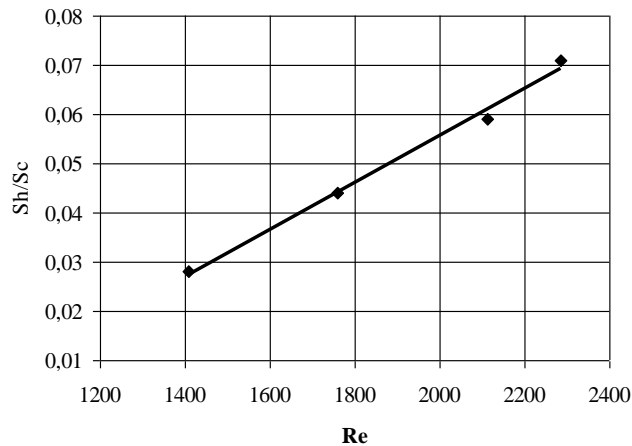


Рисунок 3.10 – Графічна залежність $Sh/Sc^{0,33} = f(Re)$ для визначення коефіцієнта A_1 та ступеня m

При розрахунку коефіцієнту масовіддачі враховано сумарну швидкість руху газового потоку.

3.4 Дослідження пристроїв для створення направленої потоку у вихрових грануляторах

Експеримент проведено при початковій швидкості закрутки газового потоку $V_{\phi 1} = 10$ м/с. В процесі проведення експериментальних досліджень поряд з візуальним спостереженням відбувався замір колової швидкості руху газового потоку, яка чинить головний вплив на структуру вихрового зваженого шару, його рівномірність та стабільність.

Газорозподільні пристрої щільного типу, з отворами та комбінованої конструкції.

Аналіз траєкторії руху гранул (середній вміст дисперсної фази у двофазній системі $\psi=0,15$) та епюр складових швидкості руху газового потоку для кожного з газорозподільних пристроїв (Рис. 3.11-3.15), які розглядаються, дозволив визначити особливості їх роботи та рекомендувати кожен з типів пристрою для певних умов застосування.

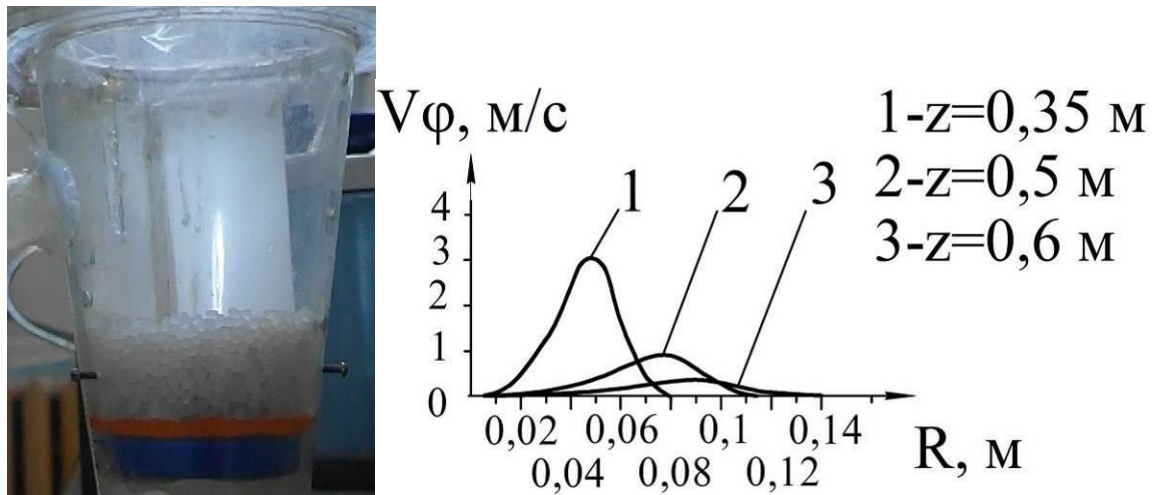


Рисунок 3.11 – Траєкторія руху гранул і епюри колової складової швидкості руху газового потоку для газорозподільного пристрою з похилими отворами

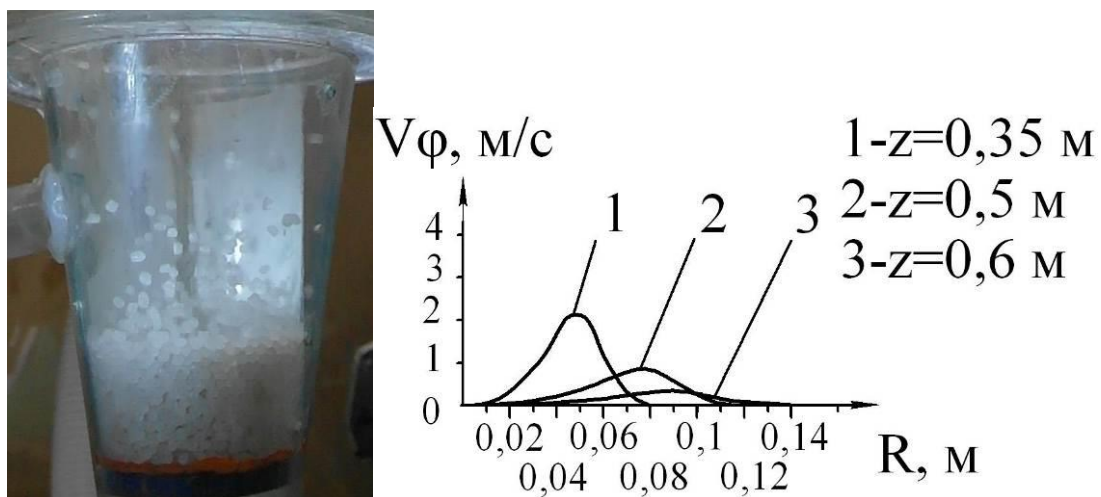


Рисунок 3.12 – Траєкторія руху гранул і епюри колової складової швидкості руху газового потоку для газорозподільного пристрою з центральними вертикальними і периферійними похилими отворами

Слід зазначити, що при збільшенні середнього вмісту дисперсної фази у двофазній системі стабільність вихрового зваженого шару для всіх типів газорозподільних пристроїв порушується, але діапазон стійкої роботи пристроїв відрізняється.

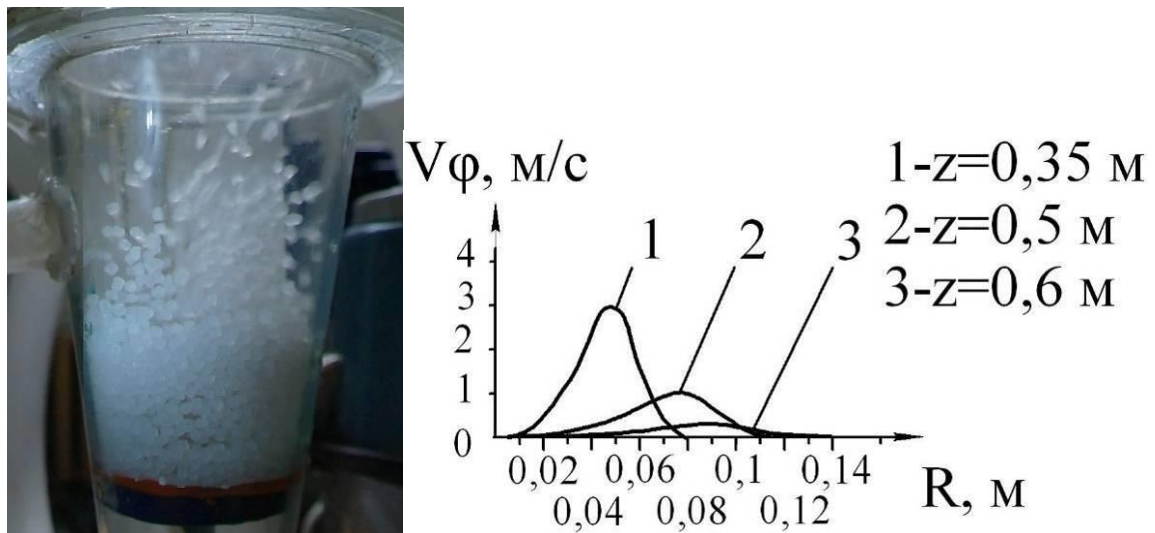


Рисунок 3.13 – Траєкторія руху гранул і епюри колової складової швидкості руху газового потоку для газорозподільного пристрою з центральними похилими і периферійними вертикальними отворами

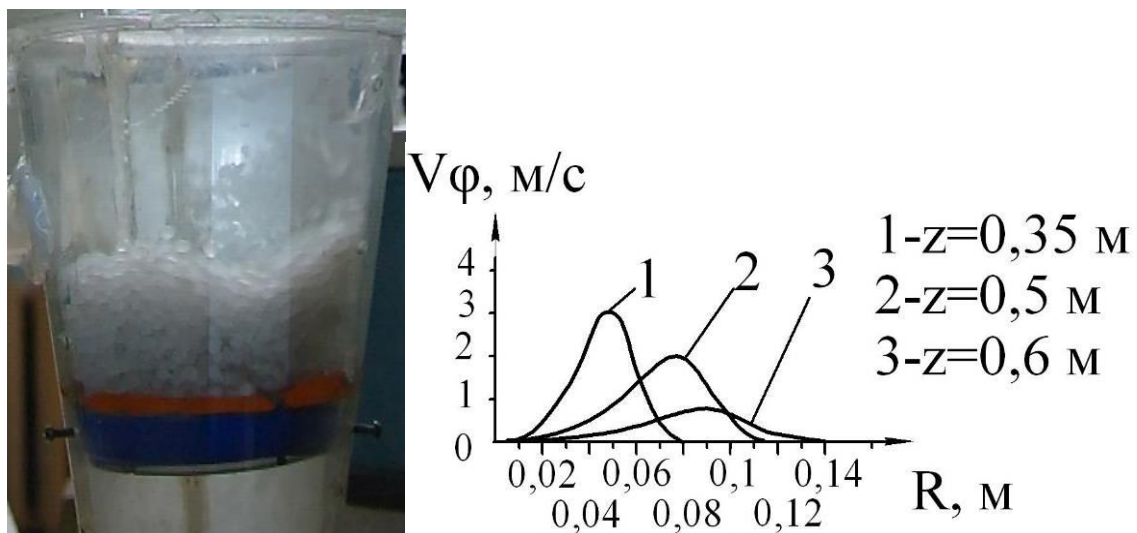


Рисунок 3.14 – Траєкторія руху гранул і епюри колової складової швидкості руху газового потоку для газорозподільного пристрою з прорізами

Газорозподільні пристрої з отворами і комбінованого типу рекомендуються до застосування апаратів малої потужності зі значенням ψ до 0,2. При більшому середньому вмісті дисперсної фази структура стабільного вихрового зваженого шару порушується, виникають спонтанні зони пульсації гранул. Особливістю зваженого шару, що створюється в апаратах із застосуванням газорозподільних пристроїв такого типу, є інтенсивне бокове перемішування гранул в так званій «активній» зоні гранулятора безпосередньо над газорозподільним пристроєм. При застосуванні в центральній частині газорозподільного пристрою вертикальних отворів спостерігається вертикальна циркуляція гранул з невеликою інтенсивністю. Такі газорозподільні пристрої поєднують в собі переваги вихрового зваженого шару з можливістю збереження міцності матеріалів з невеликим її значенням.

Газорозподільні пристрої з отворами і комбінованого типу рекомендуються до застосування апаратів малої потужності зі значенням ψ до 0,2. При більшому середньому вмісті дисперсної фази структура стабільного вихрового зваженого шару порушується, виникають спонтанні зони пульсації гранул. Особливістю зваженого шару, що створюється в апаратах із застосуванням газорозподільних пристроїв такого типу, є інтенсивне бокове перемішування гранул в так званій «активній» зоні гранулятора безпосередньо над газорозподільним пристроєм. При застосуванні в центральній частині газорозподільного пристрою вертикальних отворів спостерігається вертикальна циркуляція гранул з невеликою інтенсивністю. Такі газорозподільні пристрої вони поєднують в собі переваги вихрового зваженого шару з можливістю збереження міцності матеріалів з невеликим її значенням.

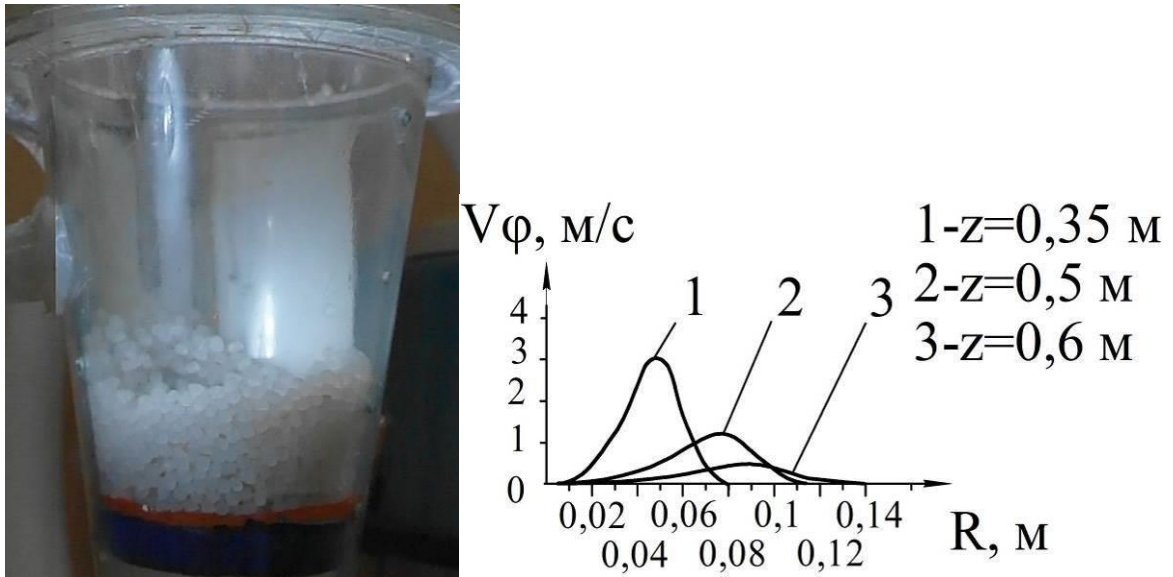


Рисунок 3.15 – Траєкторія руху гранул і епюри колової складової швидкості руху газового потоку для газорозподільного пристрою комбінованого типу (прорізи та отвори по всьому полотну)

Газорозподільний пристрій щілинного типу, як видно з (Рис. 3.16), відрізняється стабільною вихровою структурою при майже вдвічі більшому навантаженні за дисперсною фазою. Такий газорозподільний пристрій рекомендується у якості оптимального з огляду на достатньо широкий діапазон навантажень по дисперсній фазі ($\psi=0,1-0,3$) при збереженні стабільного вихрового руху потоку гранул.

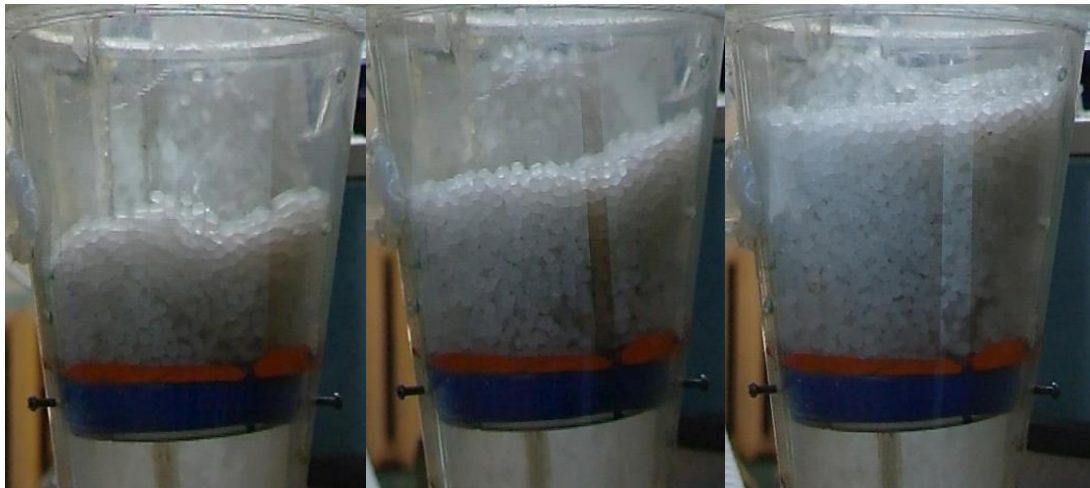
Розглянуті конструкції газорозподільних пристроїв добре себе зарекомендували для апаратів малої потужності з ψ до 0,3. Для більших потужностей і більшого відносного вмісту дисперсної фази необхідним є застосування газорозподільних пристроїв інших типів.



а

б

в



г

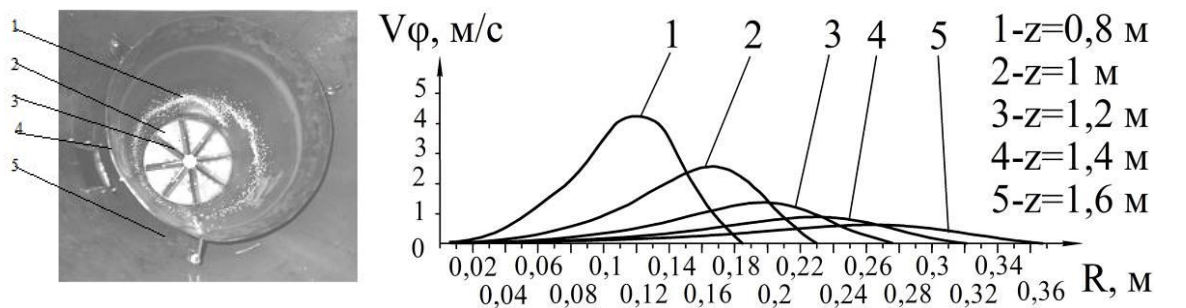
д

е

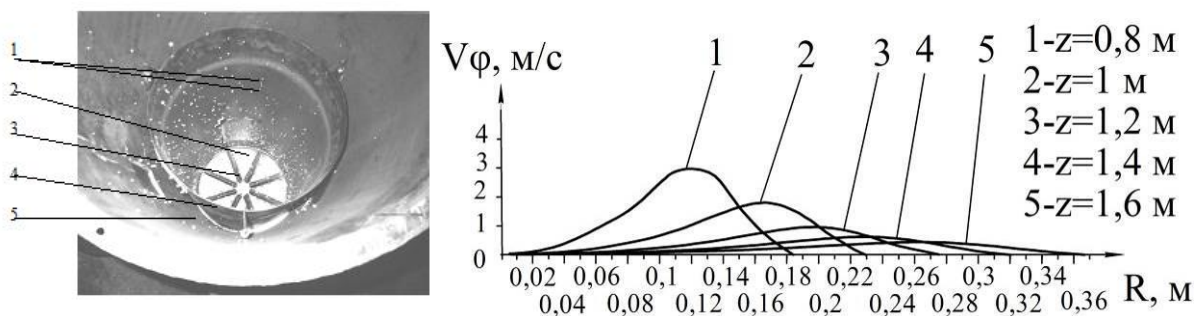
Рисунок 3.16 – Траєкторія руху гранул при застосуванні газорозподільного пристрою щілинного типу: а – $\psi=0,08$; б – $\psi=0,15$; в – $\psi=0,21$; г – $\psi=0,31$; д – $\psi=0,43$; е – $\psi=0,6$

Газорозподільний пристрій з лопостями.

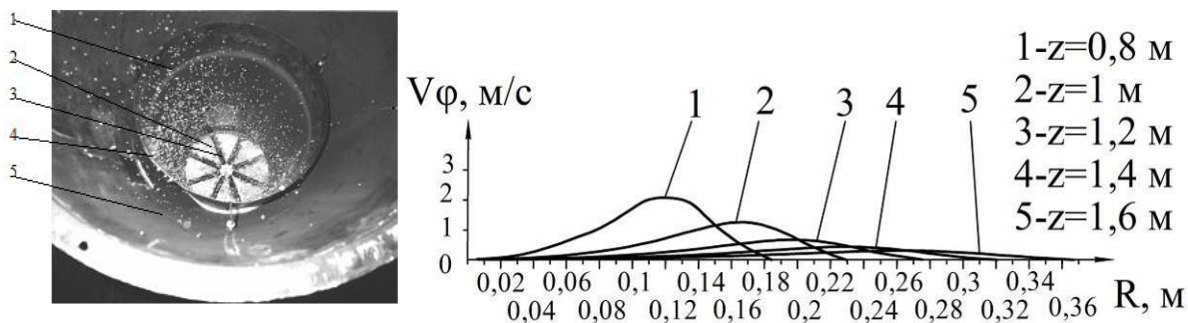
При завданні для розрахунку розподілу складових швидкостей у вхідному перерізі були розглянуті і задані варіанти епюр відповідні установці кута лопаток завихрувача вихрового гранулятора 60, 30 і 15 градусів від вертикальної осі апарата. Результати досліджень представлені на (Рис. 3.17).



а



б



в

Рисунок 3.17 – Характер розподілу гранул в апараті при установці кута нахилу лопаток завихрювача при $Q=0,63 \text{ м}^3/\text{с}$ і числі лопатей газорозподільного пристрою $n=8$ (візуальний вигляд і розподіл швидкостей по висоті гранулятора): а - 60° ; б - 30° ; в - 15° : 1 - потік гранул; 2 - завихрювач з пристроєм розвантаження готового продукту.; 3 - лопатки завихрювача.; 4 - внутрішній конус; 5 - кільцевий конічний простір для внутрішньої циркуляції ретур

Аналіз епюр складових швидкостей потоку теплоносія дозволяє припустити, що при установці кута лопаток завихрувача 60° спостерігається нерівномірний розподіл швидкостей уздовж радіуса в різних за висотою перерізах гранулятора. Це приведе до притискання гранул до стінок апарата, до ускладнення процесів класифікації і сепарації гранул через рух їх щільним шаром уздовж стінки і, як наслідок, до нерівномірного розподілу їх по об'єму гранулятора. У ході проведення експерименту було помічено, що гранули рухаються щільним обертовим шаром у вузькій пристінній зоні, що обумовлено значним розміром отриманої гранулами відцентрової сили і порівняно невеликим значенням сили опору середовища. Практично цілком відсутня внутрішня рециркуляція дрібних гранул через щільний рух і співудар їх із більш великими гранулами, що гасять частину придбаної осьової швидкості.

Характер розподілу складових швидкостей потоку теплоносія при зменшенні кута установки лопаток завихрувача до 30° дозволяє помітити тенденцію вирівнювання епюр швидкостей уздовж радіуса, що дає підставу до меншого притискання часток до стінок апарата і відриву деяких із них від стінок. Будуть створені більш сприятливі умови для протікання процесів класифікації і сепарації, ніж у попередньому випадку, що в підсумку призведе до більш рівномірного розподілу гранул по об'єму гранулятора і початку рециркуляції дрібних гранул.

Також у результаті експерименту було виявлено, що гранули рухаються по спіралеподібній траєкторії більш розрідженим кільцевим біля стінним шаром. Об'єм центральної частини внутрішнього конуса залишається не зайнятим гранулами. Дрібна фракція гранул починає виноситися з об'єму внутрішнього конуса і, завдяки отриманому відцентровому прискоренню і падінню осьової складової швидкості потоку теплоносія над площиною верхньої основи внутрішнього конуса, потрапляє в кільцевий конічний простір для внутрішньої циркуляції ретурю. Гранули з розмірами близькими до розмірів товарної фракції не залишають об'єму внутрішнього конуса, завдяки чому створюються умови для дорошування гранул до необхідного гранулометричного складу. Таким чином,

практичні результати, отримані в ході проведення експерименту, відповідають висновкам, що були отримані з аналізу теоретичних результатів.

Вигляд епюр складових швидкостей потоку теплоносія при установці кута лопаток завихрувача 15° дозволяє помітити, що одержується більш рівномірний розподіл колової складової швидкості уздовж радіуса, чим у попередніх двох випадках, що дає підставу припустити більш рівномірний розподіл гранул по об'єму гранулятора.

Провівши експеримент із кутом установки лопаток завихрувача 15° , отримані результати, що підтверджують вищевикладені припущення. З даних експерименту слід зазначити добре заповнення гранулами об'єму внутрішнього конуса, стабільне проходження процесів класифікації і сепарації, стійка циркуляція гранул дрібної фракції через кільцевий конічний простір.

Ступінь закрутки потоку теплоносія значно впливає на гідродинаміку потоку гранул у вихровому грануляторі. Для одержання рівномірного розподілу гранул в об'ємі вихрового гранулятора необхідно: прагнути до не дуже великих значень колових швидкостей, чим визначається ступінь закрутки потоку теплоносія і прагнути до максимально можливого вирівнювання розподілу складових швидкостей потоку теплоносія по перерізу гранулятора.

Зважаючи на інтенсивний рух гранул зі стабільною спіралеподбною траєкторією, приймаємо таку конструкцію газорозподільного пристрою оптимальною для апаратів середньої потужності з об'ємною концентрацією дисперсної фази у двофазному потоці до 0,4. Слід зазначити, що в разі застосування вихрового шару для апаратів великої продуктивності (при збільшенні висоти шару гранул) виникає проблема горизонтальної циркуляції гранул з центральної області до периферії апарату. Вирішити цю проблему можна при використанні апаратів з комбінованим зваженим шаром - фонтануючий шар в центрі апарату і вихровий шар на периферії апарату.

Співвідношення витрат газового потоку на закутку гранул та висхідного газового потоку

Головним чинником, що визначає структуру комбінованого зваженого шару, є співвідношення витрат газового потоку на закрутку гранул G_ϕ та висхідного газового потоку G_z . За рахунок варіювання цього співвідношення досягається направлений рух гранул з центральної частини гранулятора (область «фонтану») до периферії, де здійснюється інтенсивний вихровий рух.

На (рис. 3.18, 3.19) представлені результати експериментальних досліджень і комп'ютерного моделювання по вивченню гідродинамічних режимів роботи вихрових грануляторів з комбінованим зваженим шаром.

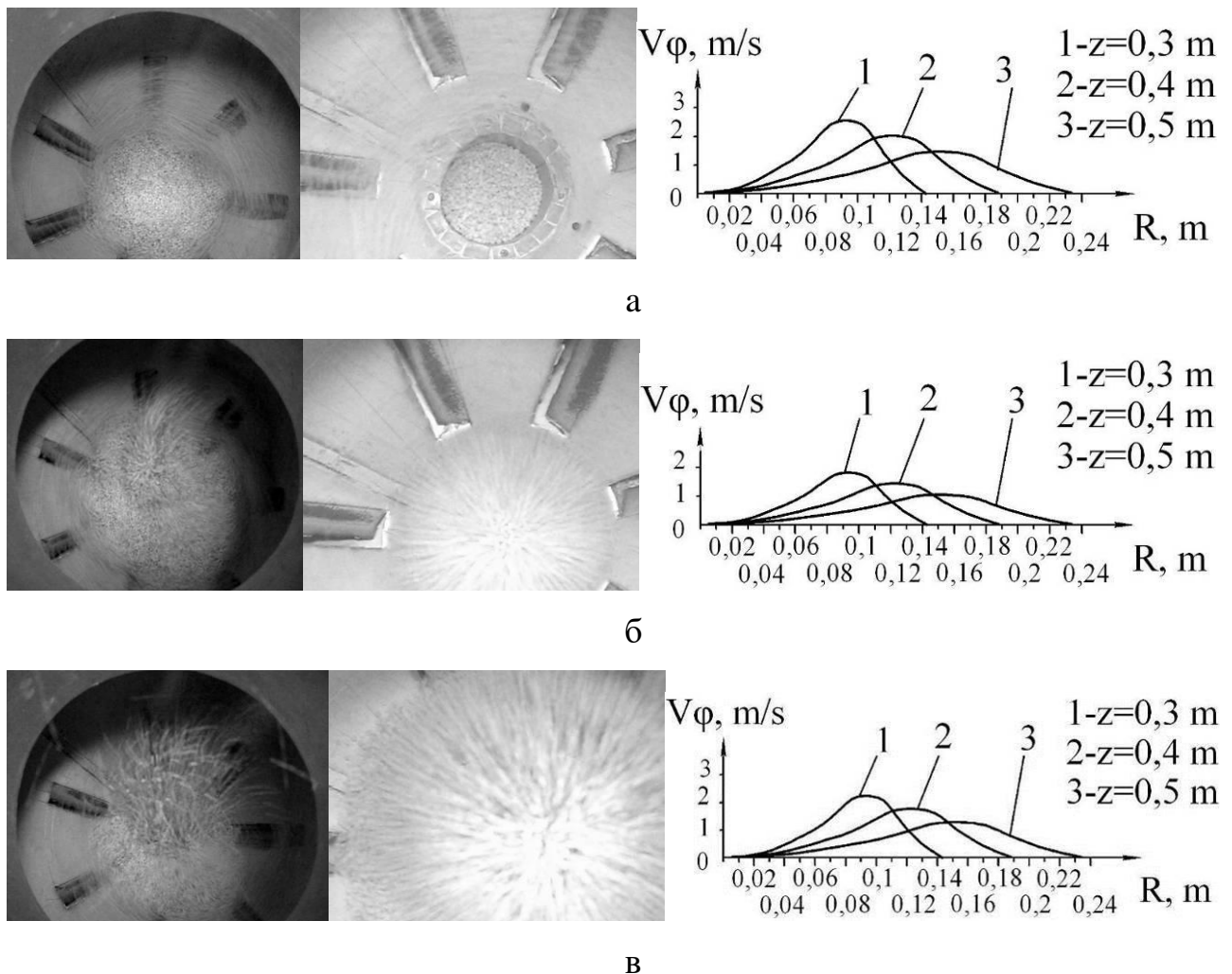


Рисунок 3.18 – Траєкторії руху гранул і колова складова швидкості газового потоку в вихровому грануляторі з комбінованим зваженим шаром при

$$Q=0,33 \text{ м}^3/\text{с}; \text{ а - } G_z=0; \text{ б - } G_\phi/G_z=2,3; \text{ в - } G_\phi/G_z=1$$

У разі використання тільки фонтануючого зваженого шару на периферії апарату спостерігаються зони зниженої швидкості, існування яких підтверджено результатами комп'ютерного моделювання (рис. 3.20).

Аналіз результатів експериментальних досліджень, а також їх співставлення з результатами комп'ютерного моделювання (рис. 3.21, 3.22) показав, що, на відміну від апаратів з вихровим шаром гранул, в апаратах з комбінованим зваженим шаром в центральній зоні апарата створюються сприятливі умови вертикальної циркуляції гранул та зведено к мінімуму фактор застоювання гранул в периферійній області на рівні газорозподільного вузла.

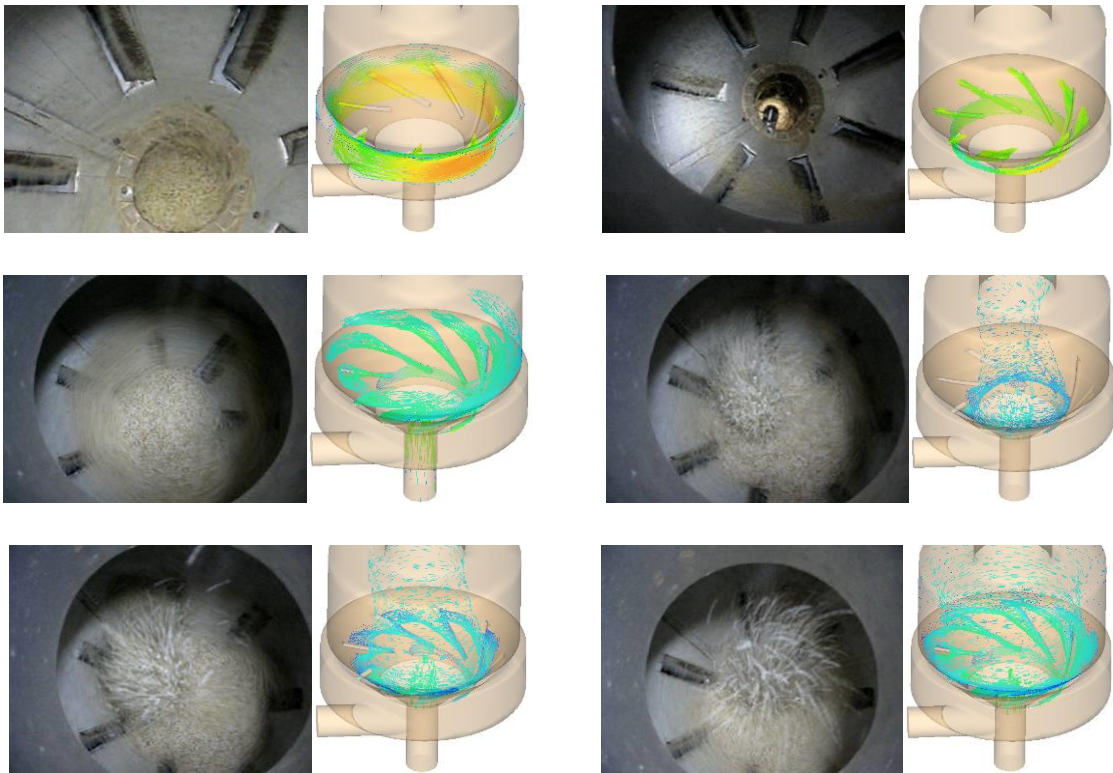


Рисунок 3.19 – Розвиток в часі комбінованого зваженого шару

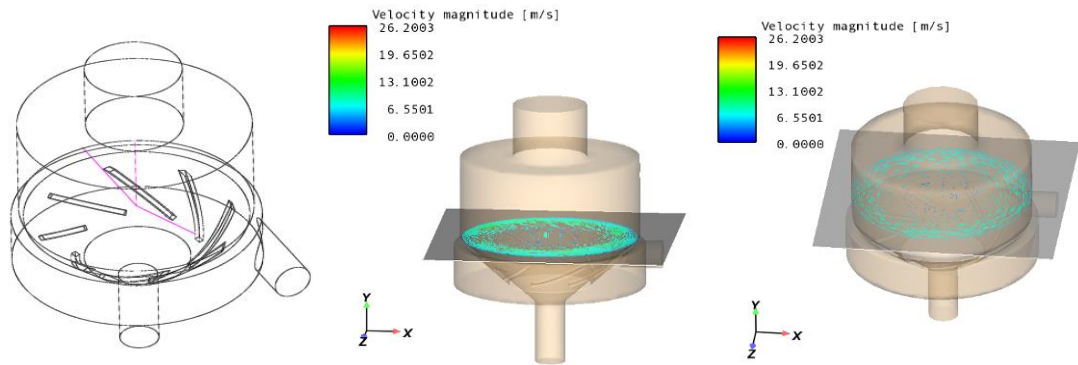


Рисунок 3.20 – Комп'ютерне моделювання гідродинаміки руху газового потоку в вихровому грануляторі з комбінованим зваженим шаром

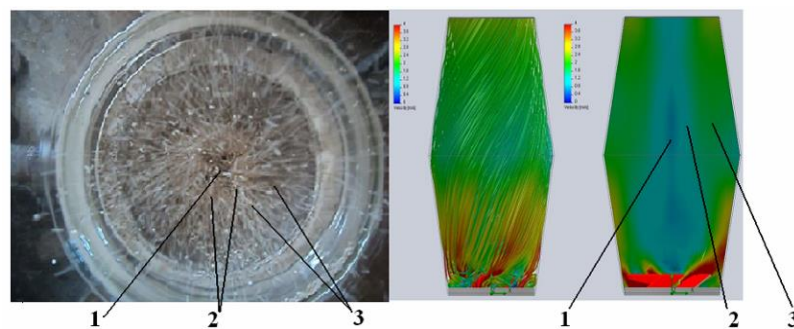
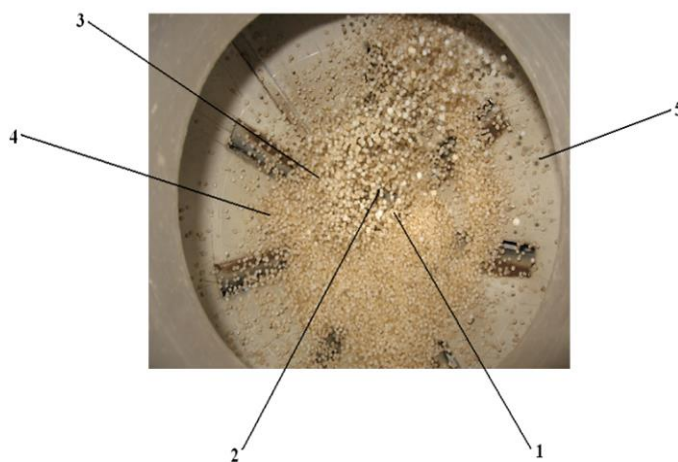


Рисунок 3.21 – Визначення характерних зон руху дисперсної фази ($G_\phi/G_z=2,3$):
1 – зона зниженої швидкості руху гранул; 2 – зона фонтануючого руху дисперсної фази; 3 – зона вихрового руху дисперсної фази



Рисункок 3.22 – Визначення характерних зон руху дисперсної фази ($G_\phi/G_z=1$):
1 - зона створення вихрового потоку; 2 - центральна зона зі зваженим шаром фонтануючого типу; 3 - зона комбінованого зваженого шару; 4 - зона вихрового зваженого шару; 5 - зона зменшення інтенсивності руху гранул

3.5 Режими роботи вихрового гранулятора

Діаграма, зображена на рис. 3.33, дає схематичне представлення характерних режимів роботи вихрового зваженого шару.

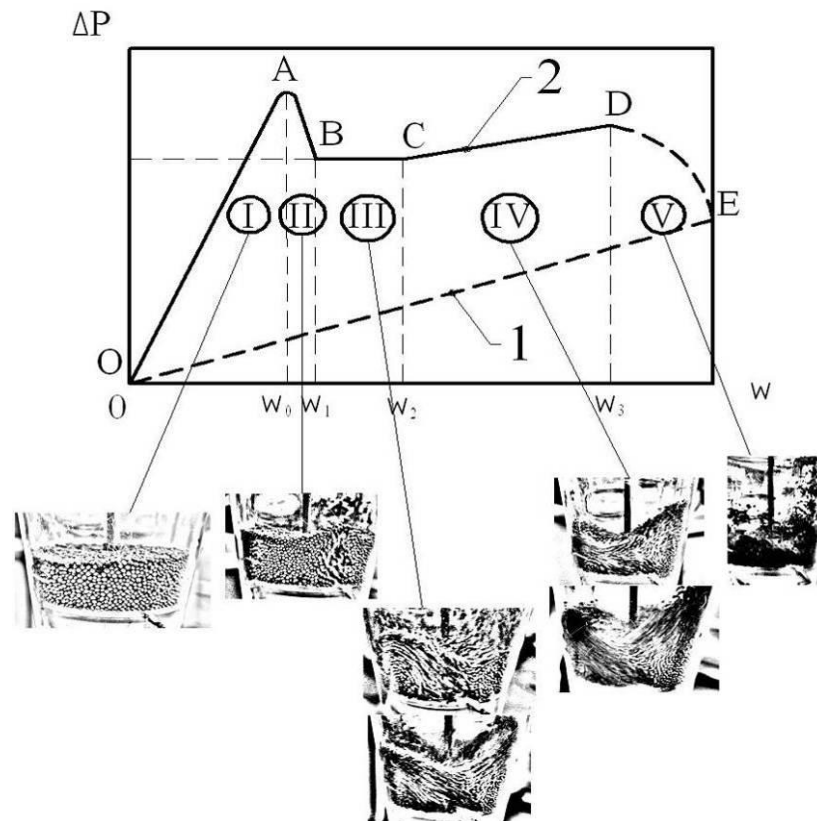


Рисунок 3.33 - Залежність перепаду тиску через шар від швидкості для вихрового зваженого шару: 1 - перепад тиску газового потоку; 2 - перепад тиску в шарі; OA - фільтрування газового потоку крізь стаціонарний шар; AB - частково зважений шар; BC - зважений шар з частковою закруткою; CD - розвинений вихровий зважений шар; DE - режим унесення гранул; w_0 - мінімальна швидкість зважування; w_1 - повна швидкість зважування; w_2 - повна швидкість вихрового зважування; w_3 - швидкість унесення

При поступовому збільшенні витрати повітря, спостерігаються наступні режими (відповідно з позначеннями на рис. 3.33):

Режим I. Фільтрування газового потоку крізь стаціонарний шар. Цей режим характерний в діапазоні швидкостей від 0 до w_0 . При досягненні значення

швидкості w_0 досягається максимальний перепад тиску. У цьому режимі нижні ділянки шару є зваженими, в той час як верхні ділянки шару ще нерухомі (Рис. 3.34).

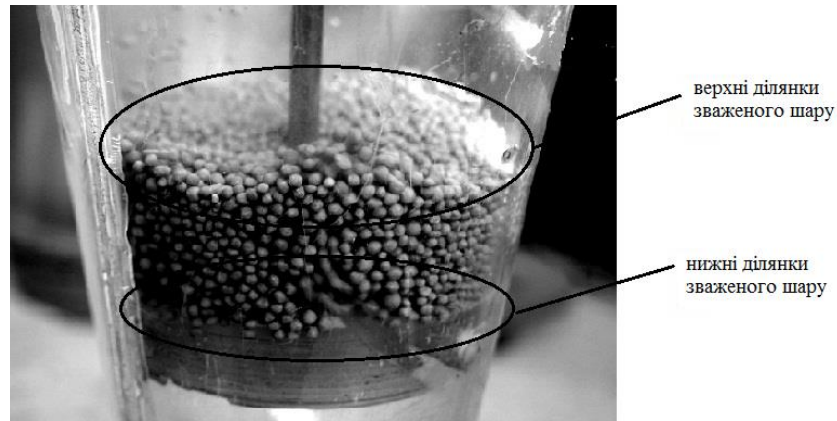


Рисунок 3.34 – Режим з фіксованим шаром

Режим II. Частково зважений шар. З підвищенням швидкості понад значення w_0 перепад тиску швидко зменшується за рахунок розширення об'єму шару, і окремі ділянки шару починають переміщатися. Гранули в нижніх ділянках шару знаходяться в звішеному стані і переміщається по круговій траєкторії з малою інтенсивністю, гранули у верхній області шару залишаються нерухомими (Рис. 3.35). При певному значенні швидкості газу (мінімальній швидкості повного зважування w_1), весь шар переходить у зважений стан, який супроводжується зниженням перепаду тиску.

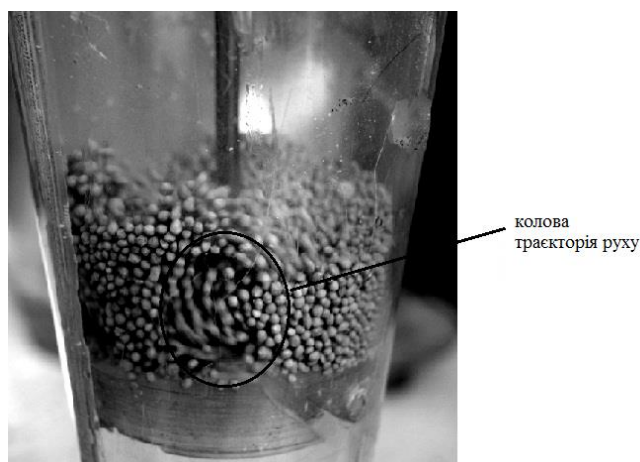


Рисунок 3.35 - Режим часткового псевдозрідження

Режим III. *Розвинений зважений шар з частковою його закруткою.* Гранули у зваженому шарі набувають хвильову траєкторію, яка характеризується локалізованим вихровим рухом, розпочатому в будь-якому випадковому місці шару. Вихор поширюється в області шару, що знаходиться над щілиною газорозподільного пристрою, а решта області знаходяться в підвішеному стані (Рис. 3.36). З підвищенням швидкості газу все більша кількість гранул втягується у вихровий рух, у той час як перепад тиску залишиться близьким постійного значення, за рахунок збільшення порозності шару. Режим існує аж до досягнення швидкості газу значення мінімальної швидкості повного вихрового режиму w_2 .

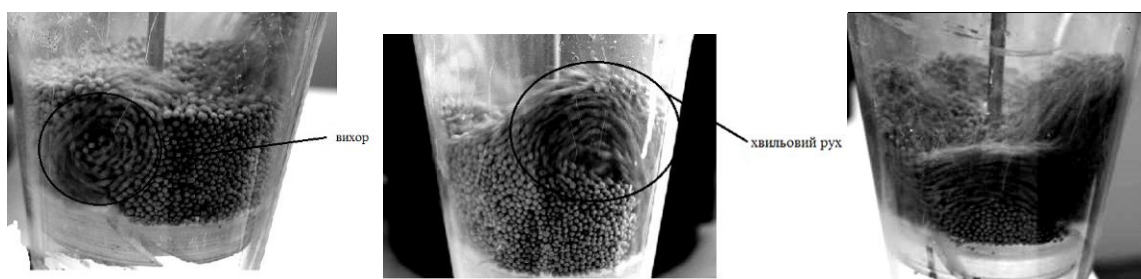


Рисунок 3.36 - Режим повного псевдозрідженого шару з частковим вихровим рухом

Режим IV. *Режим розвиненого вихрового зваженого шару.* При подальшому збільшенні швидкості повітря процес формування хвиль послаблюється, зважений шар набуває впорядковану вихрову структуру (Рис. 3.37). Режим існує в діапазоні швидкостей газу від w_2 до w_3 .



Рисунок 3.37 - Режим повного вихрового зваженого шару

Режим V. *Режим унесення гранул.* При швидкостях газového потоку вище значення w_3 простір над вихровим зваженим шаром матеріалу заповнений твердою фазою і відмінність між власне вихровим зваженим шаром і надшаровим простором полягає лише в концентрації твердого матеріалу (Рис. 3.38). У надшаровому просторі спостерігається поступове зниження концентрації гранул із збільшенням висоти. Гранули покидають вихровий шар, їх унесення обумовлене переважанням сил висхідного потоку газу над силою тяжіння.

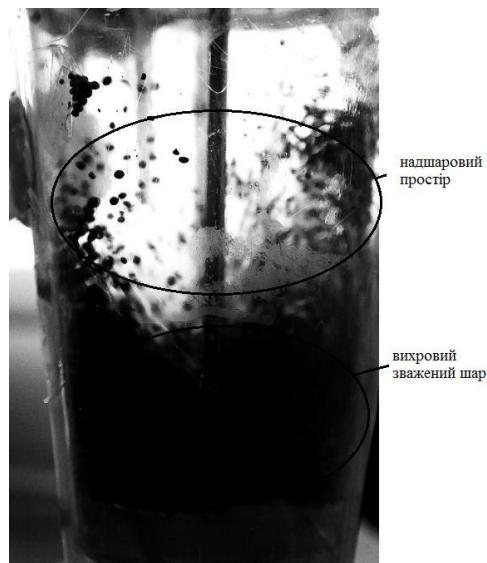


Рисунок 3.38 – Режим унесення гранул

3.6 Дослідження процесів бокового перемішування, циркуляції та класифікації гранул

Бокове перемішування та циркуляція гранул.

Зважений шар існує в межах критичних швидкостей руху газového потоку w_1 (початок зваження матеріалу) і w_2 (винесення матеріалу із зваженого шару) та характеризується різною інтенсивністю. На практиці стан шару дисперсного матеріалу у режимі зваження характеризується параметром, який має назву число псевдозрідження

$$K_w = \frac{w_p}{w_1}, \quad (3.6)$$

де w_p – робоча швидкість руху газового потоку, яка забезпечує зваження дисперсної фази.

На рис. 3.39 показані основні режими руху гранул при виході гранулятора на робочий режим з діапазоном чисел псевдозрідження в межах існування кожного з режимів. Слід зазначити, що вказані режими досліджені в діапазоні роботи вихрового гранулятора від частково зваженого шару до зваженого шару з частковим обертанням.

В режимі розвиненого вихрового зваженого шару траєкторія руху гранул у робочому просторі вихрового гранулятора має характерну спіралеподібну траєкторію, що формується поступово по мірі виходу гранулятора на робочий режим (Рис. 3.40).

При цьому одночасно відбувається класифікація полідисперсного матеріалу, хоча в апаратах циліндричної форми вона спостерігається лише частково внаслідок відсутності градієнту витратної швидкості. В апаратах з циліндричною робочою камерою можлива класифікація матеріалу в разі значного діапазону розмірів (мас) гранул.

Дані теоретичних розрахунків підтверджуються проведеними експериментальними дослідженнями на дослідних зразках ВГЗШ. При малих кутах розкриття конуса полідисперсна система складається з окремих шарів, варіанти розміщення яких представлені на рис. 3.41:

- один над одним від крупної (важкої) фракції в нижньому перетині до дрібної (легкої) у верхньому перерізі без перетину шарів між собою (Рис. 3.41а). Такий варіант можливий при широкому фракційному складі полідисперсної системи;

- один над одним від крупної (важкої) фракції в нижньому перетині до дрібної (легкої) у верхньому перерізі з перетином шарів окремих фракцій між собою (Рис. 3.41б). Цей варіант спостерігається при вузькому фракційному складі полідисперсної системи.

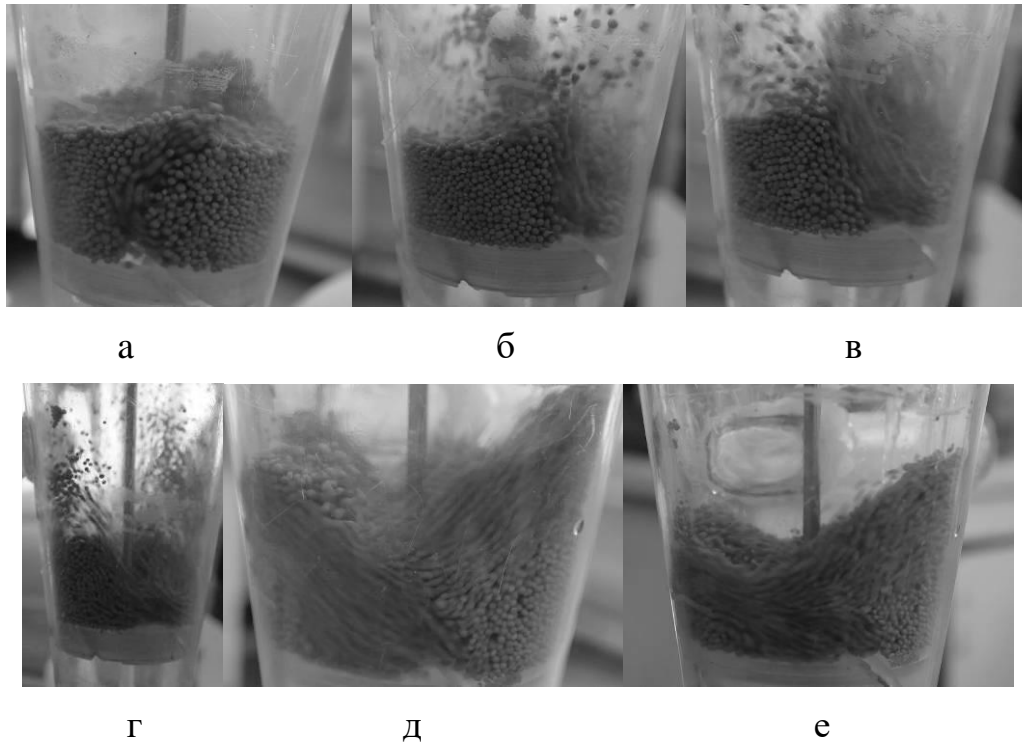


Рисунок 3.39 – Режимы циркуляції гранул у вихровому грануляторі: а - циркуляція в області завихрювача ($K_w = 1-1,5$); б - розширення зони циркуляції ($K_w = 1,6-2,2$); в - початок бічного перемішування ($K_w = 2,3-3$); г - інтенсивне бічне перемішування ($K_w = 3,1-3,5$); д - інтенсивне бічне і часткове вертикальне перемішування ($K_w = 3,6-4,2$); е - інтенсивне бічне перемішування і переміщення гранул з центральної області до периферії ($K_w = 4,3-5$)



Рисунок 3.40 – Вихід гранулятора з циліндричною камерою на робочий режим (зміна траєкторій руху гранул), класифікація гранул

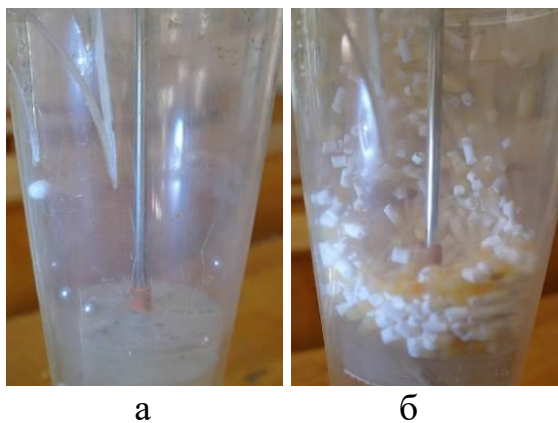


Рисунок 3.41 – Розподіл гранул в робочому просторі вихрового гранулятора: а - широкий фракційний склад полідисперсної системи; б - вузький фракційний склад полідисперсної системи



Рисунок 3.42 – Класифікація гранул за масою в робочому просторі вихрового гранулятора

Зміна траєкторії руху гранул дрібної фракції показано на рис. 3.43.

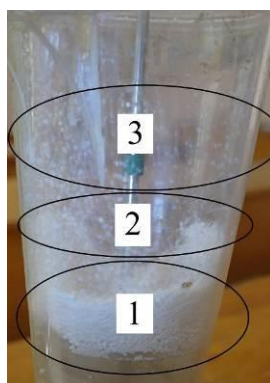


Рис. 3.43 - Сепарація частинок у вихровому грануляторі зваженого шару: 1 - вихровий зважений шар; 2 - комбінований зважений шар з вихровим і висхідним потоком гранул; 3 - зважений шар з висхідним потоком гранул

4 ПРОГРАМНА РЕАЛІЗАЦІЯ РОЗРАХУНКІВ

В основу програмного продукту Vortex Granulator[©] покладена система рівнянь Нав'є-Стокса і рівняння нерозривності потоку (однофазний потік) і система диференціальних рівнянь руху гранули в циліндричній системі координат.

В основу програмного продукту Classification in vortex flow [©] покладено математичну модель класифікації та сепарації гранул в вихровому грануляторі, а також система диференціальних рівнянь кінетики прогріву гранули та кінетики видалення вологи з гранули.

У програмі Vortex Granulator[©] використано 9 класів і один файл стилів.

Модель програми представлена у вигляді UML діаграми (рисунок 3.1)

Клас Main.java відповідає за відображення головного меню і підключення до нього інших файлів програми.

Клас ControllerInput.java забезпечує введення даних для розрахунку складових швидкості газового потоку і гранул і сумарних швидкостей цих фаз.

Клас Theory.java надає теоретичні відомості про вихровий гранулятор, його переваги та недоліки.

Класи SpeedGas.java і Granuly.java відображають графічні залежності складових швидкостей (вертикальної, радіальної та колової) газового потоку і гранул.

Клас Trajectory.java відображає сумарні швидкості.

Клас Functional.java зберігає вхідні значення програми і містить методи вирішення і формування масивів даних для відображення графічних залежностей.

Класи Error.java і AlertBox.java призначені для перевірки коректності введених даних і обробки можливих помилок при роботі з програмою.

Програма Classification in vortex flow[©] має 7 класів і один файл стилів.

Модель програми представлена у вигляді UML діаграми (Рис. 4.2).

Клас Main.java відповідає за відображення головного меню і підключення до нього інших файлів програми.

Клас DataInput.java зберігає вхідні значення програми і містить методи вирішення і формування масивів даних для відображення графічних залежностей.

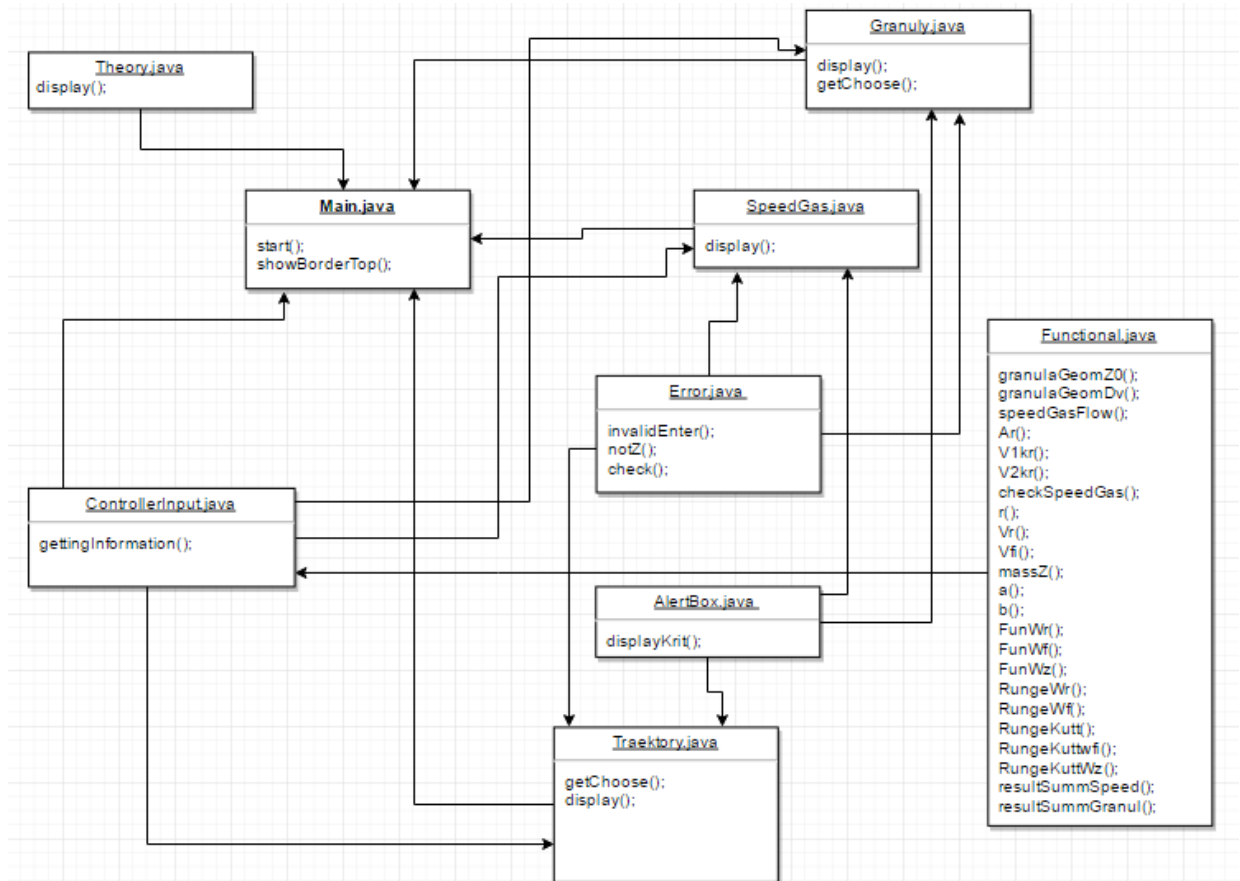


Рисунок 4.1 – Модель програми Vortex Granulator[©]

Клас ControllerInputSpeedGas.java містить в собі клас по відображенню графічного інтерфейсу програми.

Клас Graph.java відповідає за виведення отриманих значень у вигляді графічних залежностей.

Клас Excelgenerator.java формує документ у форматі електронної таблиці за отриманими значеннями.

Класи Error.java і AlertBox.java призначені для перевірки коректності введених даних і обробки можливих помилок при роботі з програмою.

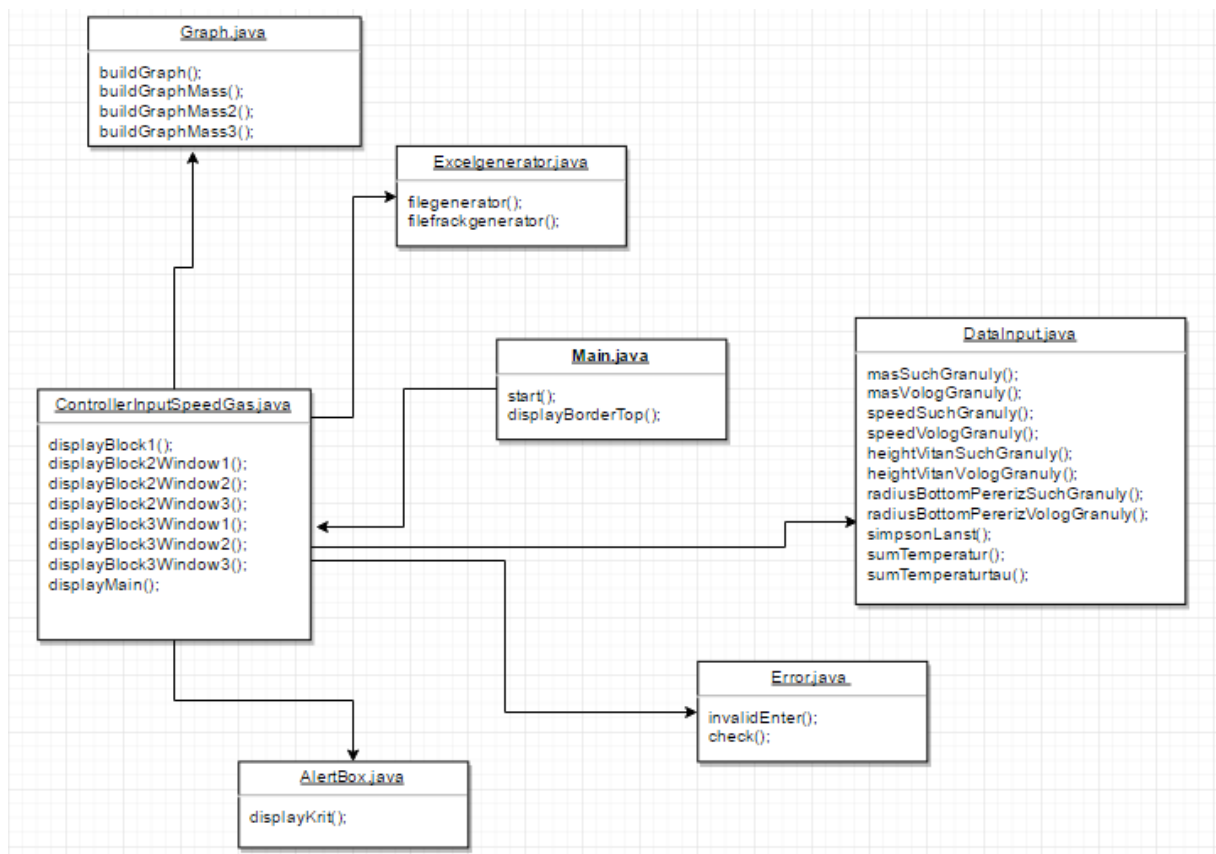


Рисунок 4.2 – Модель програми Classification in vortex flow[©]

Основним класом в програмі Vortex Granulator[©] є клас Main.java який, відповідає за відображення головного меню і підключення до нього інших класів. За замовчуванням після запуску програми в першу чергу підключається клас, який відповідає за введення даних. Після введення вхідних параметрів (Рис. 4.3), програма перевіряє їх на коректність за допомогою класу Error.java. Якщо виникають помилки введення, програма викликає клас AlertBox.java, що відповідає за виведення інформації про помилку. Перевірені дані потрапляють в клас Functional.java, який відповідає за їх зберігання і розрахунок.

Програма має 3 області розрахунку: складові швидкості газового потоку, складові швидкості гранул, сумарні швидкості газового потоку і гранул. При активації пунктів меню програма розраховує відповідно радіальну, вертикальну, колову складові швидкостей газового потоку (Рис. 4.4) і гранул (Рис. 4.5).

Результати розрахунків можуть бути виведені у вигляді графічних залежностей.

Рисунок 4.3 – Блок введення вхідних даних

Рисунок 4.4 – Вікно побудови графічних залежностей складових швидкості газового потоку

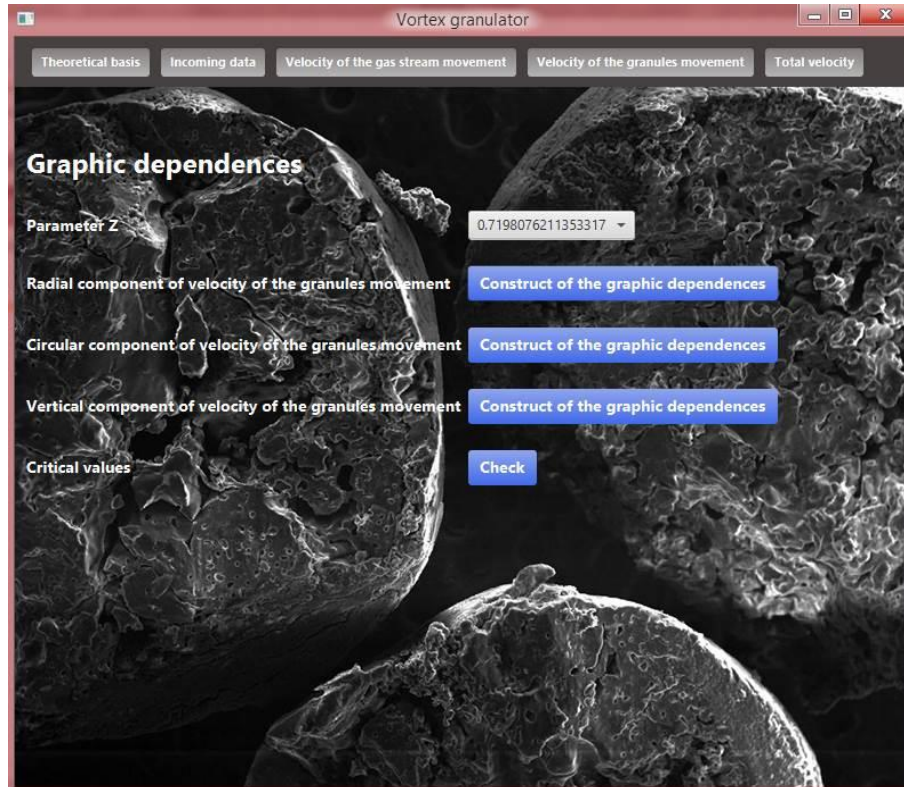


Рисунок 4.5 – Вікно побудови графічних залежностей складових швидкості гранули

Основними методами знаходження складових і сумарних швидкостей газового потоку і гранул є такі методи:

а) public speedGas - розраховує вертикальну складову швидкості газового потоку по висоті робочого простору вихрового гранулятора (Рис. 4.6);

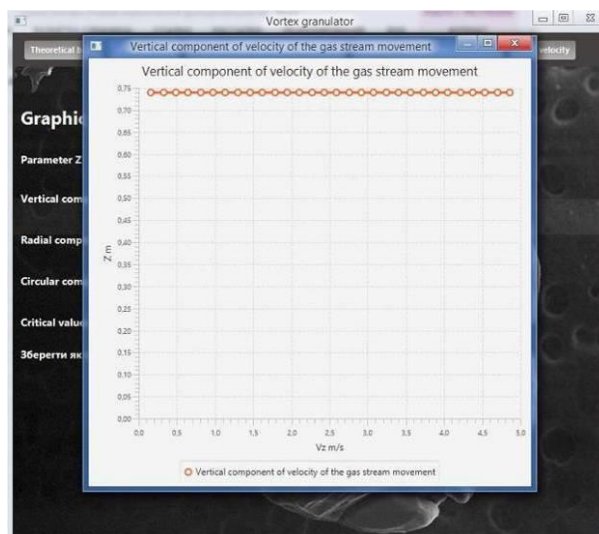


Рисунок 4.6 – Вертикальна складова швидкості руху газового потоку

б) public V_r - розраховує радіальну складову швидкості газового потоку по радіусу вихрового гранулятора (Рис. 4.7);

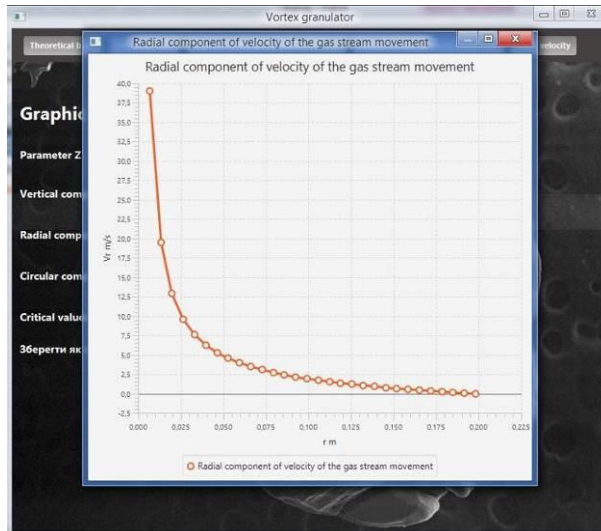


Рисунок 4.7 – Радіальна складова швидкості руху газового потоку

в) public V_{fi} - розраховує колову складову швидкості газового потоку по радіусу вихрового гранулятора (Рис. 4.8);

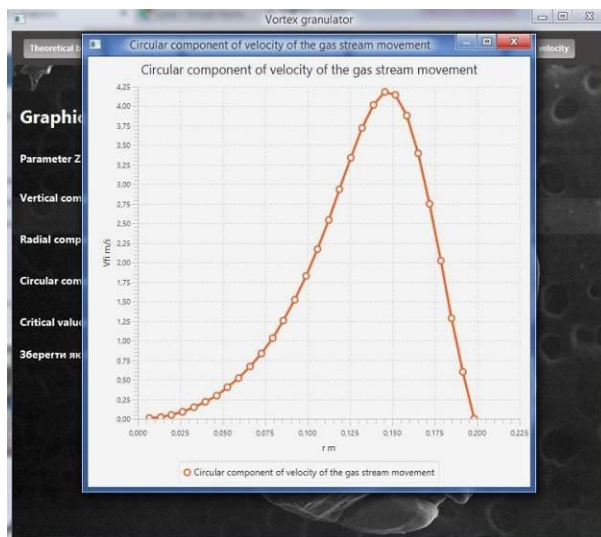


Рисунок 4.8 – Колова складова швидкості руху газового потоку

г) public RungeKutt - реалізує алгоритм Рунге-Кутта для знаходження значення радіальної складової швидкості гранул;

г) public W_r - розраховує радіальну складову швидкості гранул по радіусу вихрового гранулятора (Рис. 4.9);

д) `public RungeKuttWfi` - реалізує алгоритм Рунге-Кутта для знаходження значення колової складової швидкості гранул;

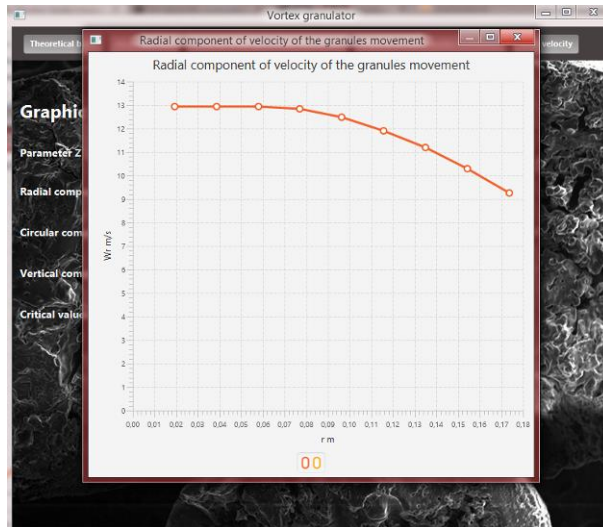


Рисунок 4.9 – Радіальна складова швидкості руху гранули

е) `public Wfi` - розраховує колову складову швидкості гранул по радіусу вихрового гранулятора (Рис. 4.10);

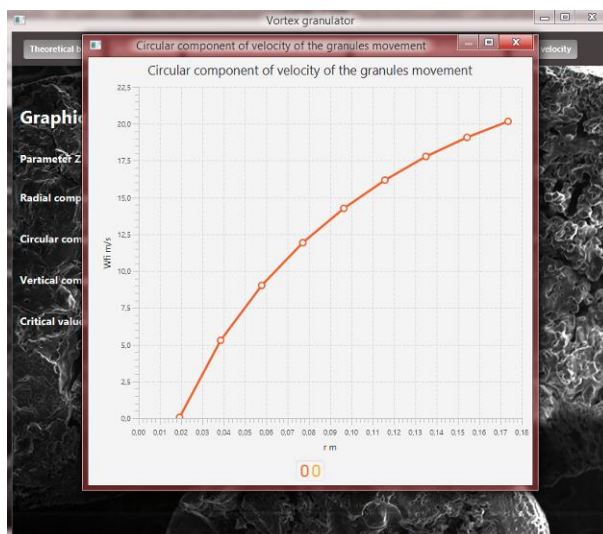


Рисунок 4.10 – Колова складова швидкості руху гранули

є) `public RungeKuttWz` - реалізує алгоритм Рунге-Кутта для знаходження значення вертикальної складової швидкості гранул;

ж) `public Wz` - розраховує вертикальну складову швидкості гранул по висоті робочого простору вихрового гранулятора (Рис. 4.11);

з) public resultSummSpeed - розраховує сумарну швидкість газового потоку по радіусу вихрового гранулятора (Рис 4.12);

и) public resultSummGranul - розраховує сумарну швидкість гранул по радіусу вихрового гранулятора (Рис. 4.13).

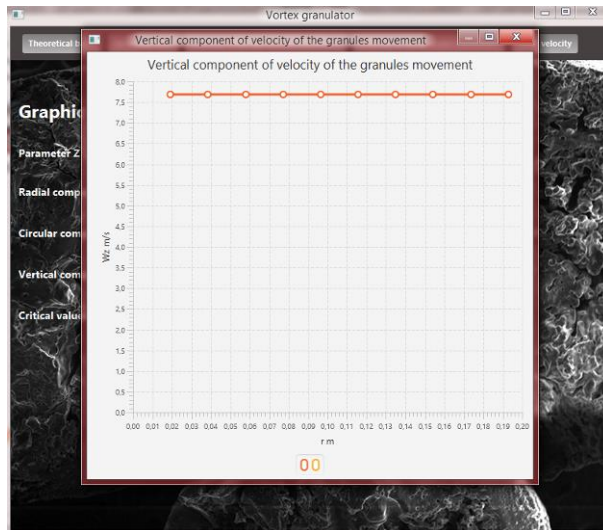


Рисунок 4.11 – Вертикальна складова швидкості руху гранули



Рисунок 4.12 – Сумарна швидкість руху газового потоку

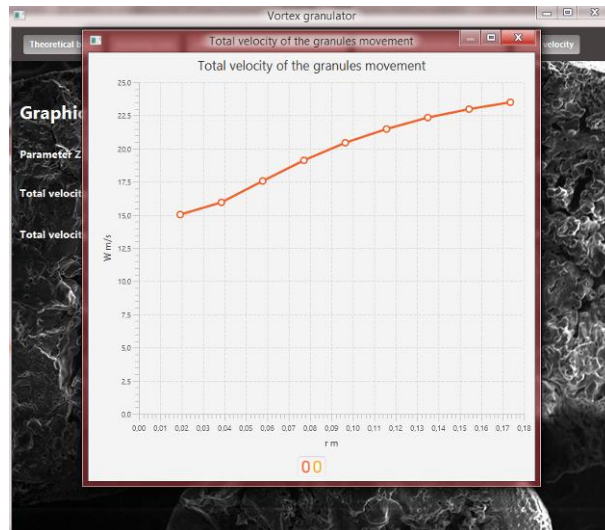


Рисунок 4.13 – Сумарна швидкість руху гранули

Основним класом в програмі Classification in vortex flow © є клас Main.java, який відповідає за відображення головного меню і підключення до нього інших класів. Після запуску, програма відображає модель (Рис. 4.14) і загальні параметри гранулятора (Рис. 4.15).

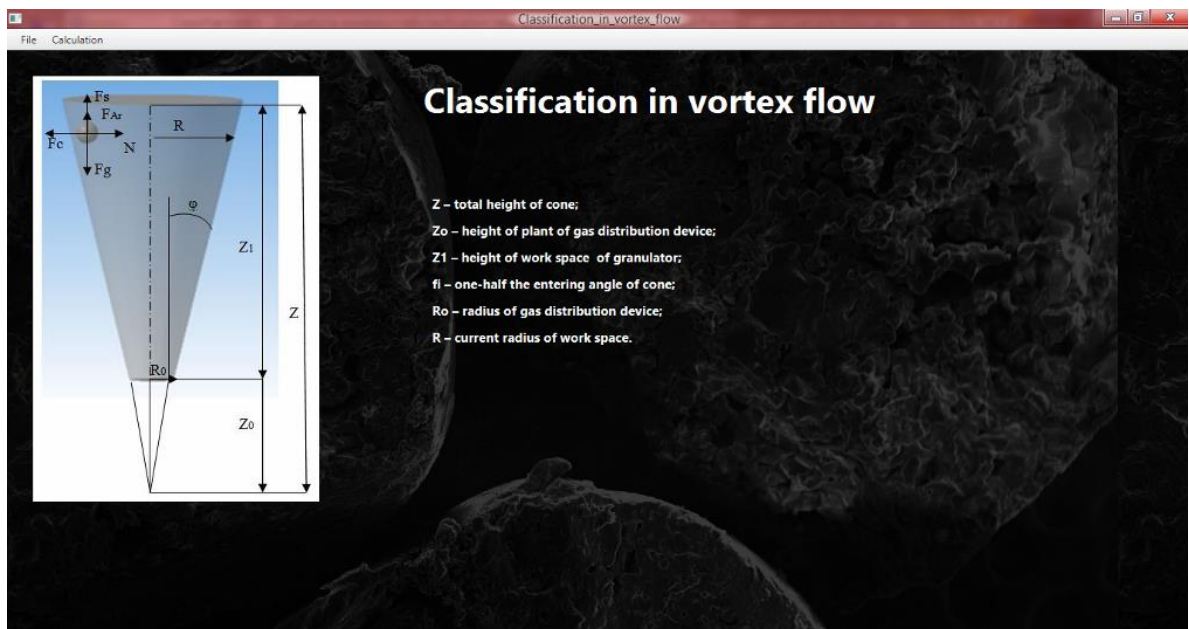


Рисунок 4.14 – Розрахункова область гранулятора

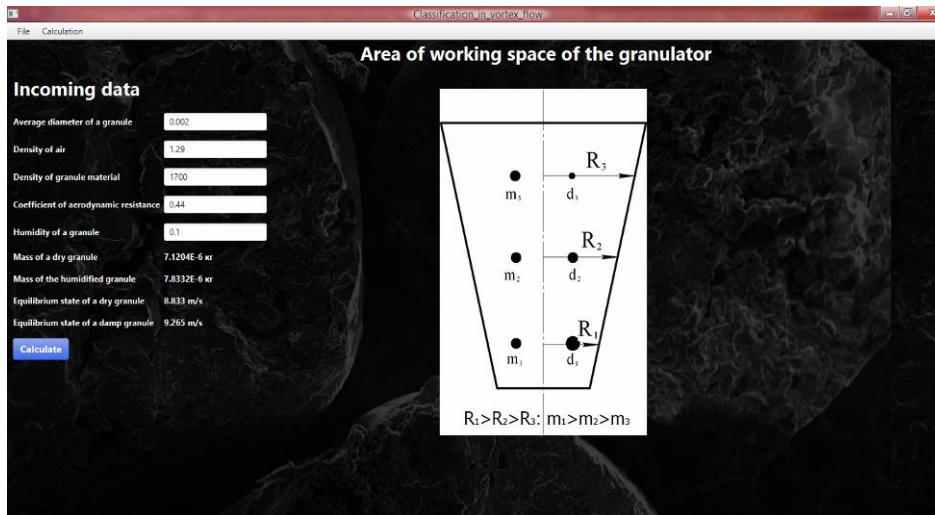


Рисунок 4.15 – Вікно введення початкових даних. Швидкість газového потоку

Програма має 3 області розрахунку:

а) Швидкість газového потоку (Рис. 4.15).

б) Геометрія робочого простору:

1) розрахунок при змінній витраті повітря - виводяться залежності висоти робочого простору і радіуса поперечного перерізу від витрати повітря для сухих і вологих гранул (Рис. 4.16);

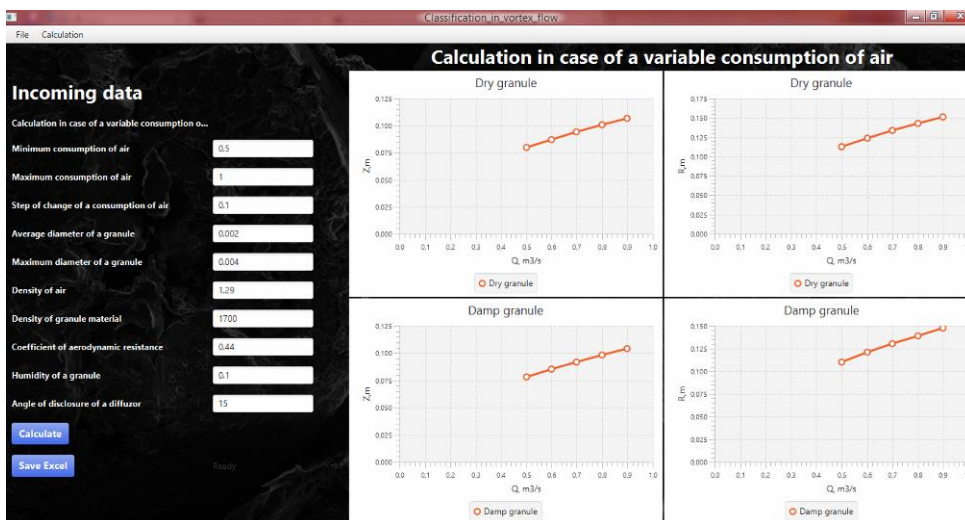


Рисунок 4.16 – Розрахунок геометрії робочого простору вихрового гранулятора при змінній витраті повітря

2) розрахунок при змінному куті розкриття дифузора - виводяться залежності висоти робочого простору від кута розкриття дифузора для сухих і вологих гранул (Рис. 4.17);

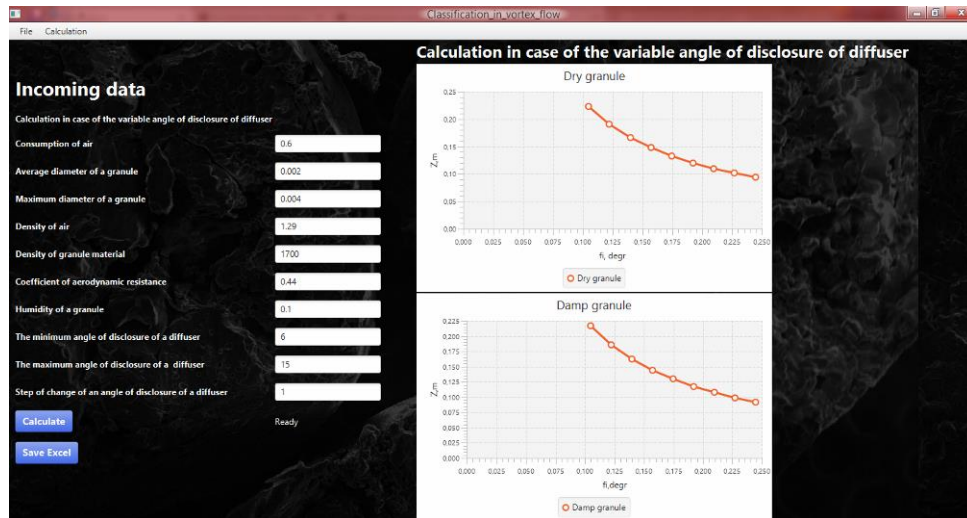


Рисунок 4.17 – Розрахунок геометрії робочого простору вихрового гранулятора при змінному куті розкриття дифузора

3) розрахунок розподілу гранул по фракціям в робочому просторі гранулятора - виводиться розподіл гранул різного діаметру по висоті робочого простору вихрового гранулятора (Рис. 4.18).

в) Розрахунок маси і кінетики прогріву гранули:

1) розрахунок маси гранули (Рис. 4.19);

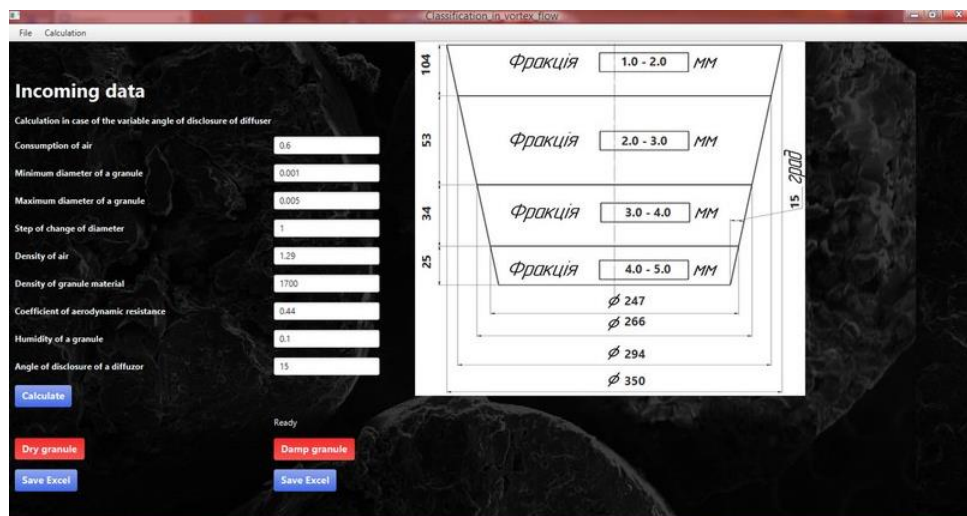


Рисунок 4.18 – Розрахунок розподілу гранул по фракціям в робочому просторі гранулятора

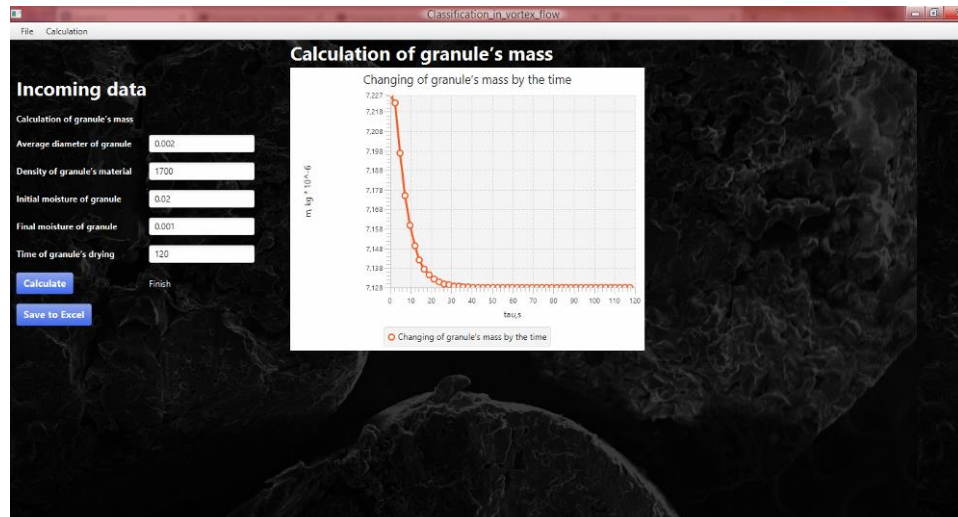


Рисунок 4.19 – Розрахунок маси гранули

2) розрахунок кінетики прогріву гранули (розподіл температури по радіусу гранули) (Рис. 4.20);

3) розрахунок кінетики прогріву гранули (зміна температури гранули в часі) (Рис. 4.21).

Для розрахунку відповідних величин, необхідно вибрати конкретний пункт, ввести дані і натиснути на кнопку «Розрахувати». Програма перевірить коректність даних, потім розрахує відповідні величини і візуалізує отримані значення у вигляді графічних залежностей. У програмі Classification in vortex flow[©] є можливість зберегти отримані результати в форматі електронної таблиці.

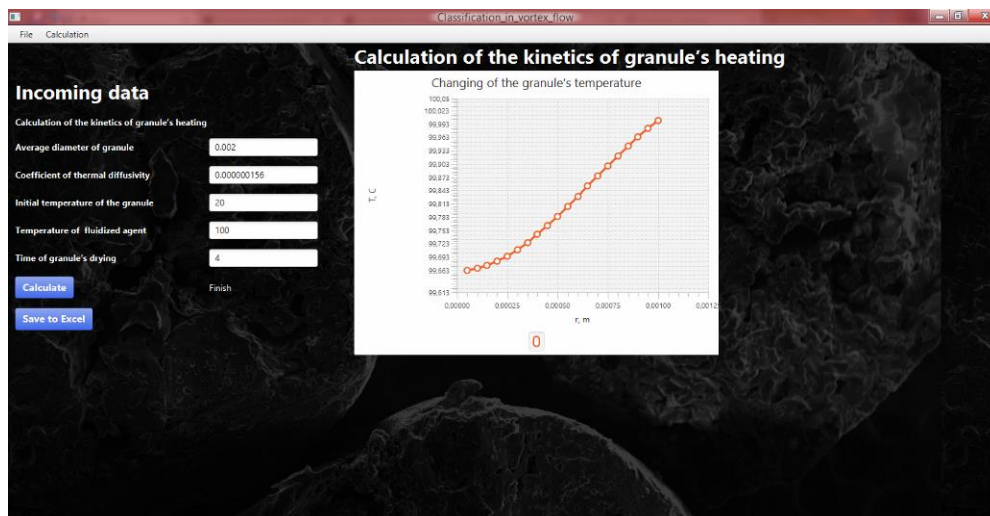


Рисунок 4.20 – Розрахунок кінетики прогріву гранули (розподіл температури по радіусу гранули)

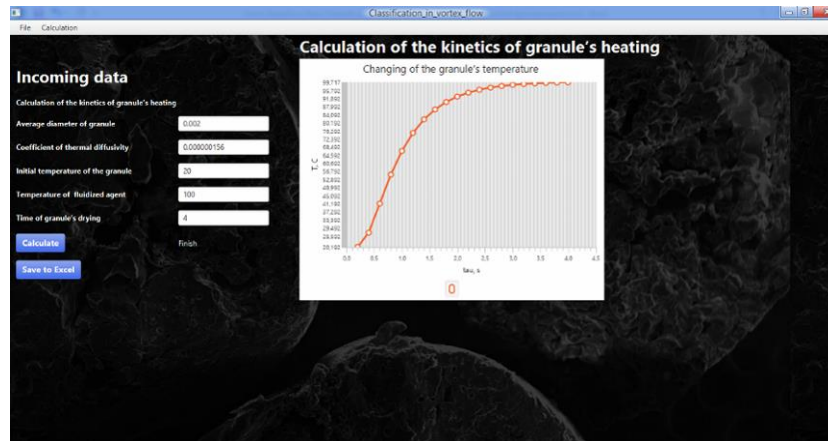


Рисунок 4.21 – Розрахунок кінетики прогріву гранули (зміна температури гранули в часі)

Основними методами розрахунку є:

- а) `public double masSuchGranuly` - розраховує масу сухої гранули;
- б) `public double masVologGranuly` - розраховує масу вологої гранули;
- в) `public double speedSuchGranuly` - розраховує швидкість сухої гранули;
- г) `public double speedVologGranuly` - розраховує швидкість вологої гранули;
- ґ) `public double heightVitanSuchGranuly` - розраховує висоту польоту сухої гранули;
- д) `public double heightVitanVologGranuly` - розраховує висоту польоту вологої гранули;
- е) `public double radiusBottomPererizSuchGranuly` - розраховує радіус нижнього перерізу гранулятора для сухої гранули;
- є) `public double radiusBottomPererizVologGranuly` - розраховує радіус нижнього перерізу гранулятора для вологої гранули;
- ж) `public double simpsonLanst` - реалізує алгоритм Сімпсона і призначений для розрахунку інтегралів;
- з) `public double sumTemperatur` - розраховує кінетику прогріву гранули (розподіл температури гранули по радіусу)
- и) `public double sumTemperaturtau` - розраховує кінетику прогріву гранули (зміна температури гранули в часі).

5 ОСНОВНІ МЕТОДИ УТИЛІЗАЦІЇ ВІДХОДІВ ВИРОБНИЦТВА АМІАЧНОЇ СЕЛІТРИ

1.1 Короткий огляд методів

Проблема екологічної безпеки хімічних виробництв стає все більш актуальною. Основними екологічними проблемами на сучасному етапі розвитку підприємств хімічних і нафто газопереробних виробництв є: забруднення водних об'єктів, атмосферного повітря, збільшення відходів виробництва та споживання і т.п..

Виробництво гранульованих продуктів (у тому числі гранул азотних добрив – аміачної селітри, карбаміду) – великий сектор хімічної промисловості. Поліпшення якості азотних мінеральних добрив і показників по споживанню енергії та екологічної безпеки при їх виробництві до рівня світових вимог – важливе завдання підприємств-виробників. Підвищення показників ефективності виробництв і покращення якості кінцевої продукції йде в двох напрямках: зміна в технології та процесах; підвищення енергетичної та екологічної ефективності основного технологічного обладнання діючих виробництв.

Відходами установок виробництва аміачної селітри є:

- газоповітряна дисперсна система, яка містить у своєму складі пил аміачної селітри, оксиди азоту та аміак;
- гранули дрібної фракції, які не можуть бути використані в сільському господарстві.

Основні напрями утилізації відходів виробництва аміачної селітри та обладнання, яке застосовується:

1. Уловлювання дрібної фракції і пилу з подальшим відправленням на приготування розплаву – вихрові пиловловлювачі та сепараційні ступені.
2. Уловлювання аміаку з утворенням аміачної води для потреб виробництва – вихрові контактні тепломасообмінні ступені.
3. Уловлювання дрібної фракції з наступною відправкою на дорощування – відбувається безпосередньо в вихровому грануляторі.

4. Уловлювання нижчих оксидів азоту, до окиснення їх до вищих оксидів, відправка на виробництво азотної кислоти – система «реактор-вихровий ежектор».

5. Термічне розкладання некондиційної аміачної селітри з утворенням нижчих оксидів азоту, доокиснення їх до вищих оксидів, відправка на виробництво азотної кислоти – система «реактор-вихровий ежектор».

1.2 Застосування вихрових потоків при гранулюванні, класифікація і сепарація гранул

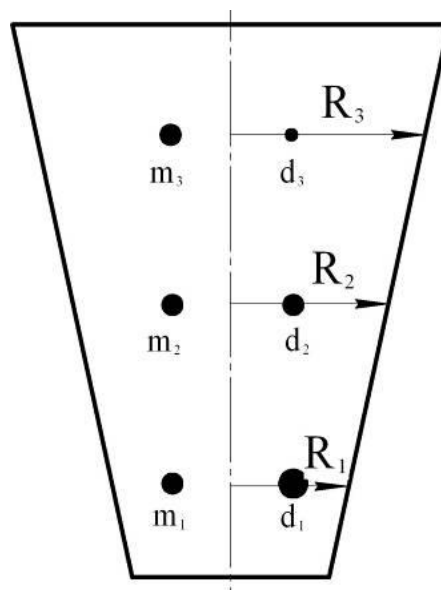
Ефективним методом класифікації твердої фази є використання апаратів із змінною площею поперечного перерізу робочого простору. Завдяки створенню в об'ємі апарату полів складових швидкості руху газового потоку по висоті гранулятора створюється різні гідродинамічні умови для руху гранул. За висотою апарату відбувається розподіл гранул різного діаметру (за умов, що класифікуються гранули з одного матеріалу) або різної маси (в умовах створення гранул пористої структури або багатошарових гранул) (Рис. 5.1). Це дозволяє не тільки отримати продукт заданої якості, але й при одночасному проведенні сепарації і гранулюванні змінювати умови гранулоутворення.

Використання грануляторів зваженого шару зі змінною площею поперечного перерізу робочої камери і внутрішньої циркуляцією ретур дозволяє здійснювати процеси класифікації полідисперсної системи широкого фракційного складу. Завдяки створенню в робочому об'ємі апарата різних гідродинамічних умов руху газового потоку на різних висотних відмітках стає можливо класифікувати гранули на необхідну кількість фракцій і провести сепарацію дрібних частинок.

Класифікація гранул.

Для опису механізму класифікації гранул проведемо аналіз сил, що діють на гранулу в закрученому газовому потоці. У загальному випадку переміщення частинки в газовому потоці викликано дією сил, що діють на поверхню частинки

з боку газового потоку (аеродинамічного опору, Архімеда, сила Бассе та ін.), а також масових і зовнішніх сил (тяжіння, відцентрова, Коріоліса, реактивна та ін.).



$$R_1 > R_2 > R_3; m_1 > m_2 > m_3$$

Рисунок 5.1 – Розподілення гранул за розмірами і масою в робочому просторі вихрового гранулятора

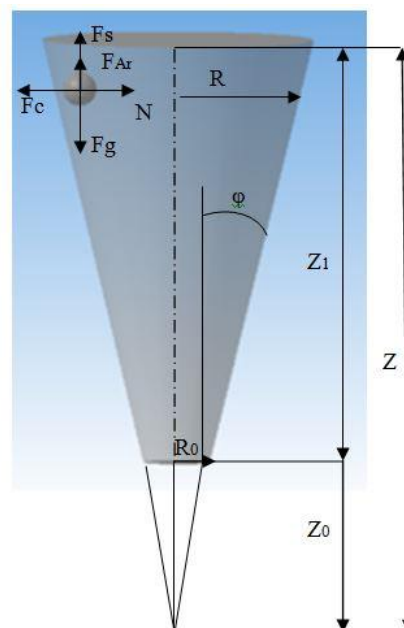


Рисунок 5.2 – Розрахункова схема робочого простору вихрового гранулятора:
 Z – загальна висота конуса; Z_0 – висота установки газорозподільного пристрою;
 Z_1 – висота робочого простору гранулятора; φ – половина кута розкриття конуса;
 R_0 – радіус газорозподільного пристрою; R – радіус робочого простору

Аналіз величини сил показав, що поряд з силою тяжіння F_g на характер переміщення частинки впливають такі сили: аеродинамічного опору F_s , Архімеда F_{Ar} , відцентрова F_c і реакції стінки N (Рис. 5.2). Іншими силами можна знехтувати. Для визначення умови рівноваги частинки в газовому потоку розглянемо сили, які діють паралельно осі гранулятора. Такими являються сила тяжіння F_g і сила аеродинамічного опору F_s . Сила Архімеда F_{Ar} внаслідок значної різниці густини газового потоку і частинок значного впливу на осьове переміщення гранул.

Умови рівноваги частинок:

$$F_s = F_g. \quad (5.1)$$

В загальному випадку залежність для розрахунку сили аеродинамічного опору наводиться у вигляді

$$F_s = \int_S dF_s, \quad (5.2)$$

де S – площа поперечного перерізу робочого простору гранулятора, м^2 .

Значення dF_s визначається по формулі:

$$dF_s = \psi \cdot \frac{\rho_{gas} V_{op}^2}{2} dS, \quad (5.3)$$

де ψ – коефіцієнт аеродинамічного опору частинки газовому потоку;

ρ_{gas} – густина газового потоку, $\text{кг}/\text{м}^3$;

dS – елементарна площа, нормальна до напрямку руху газового потоку, м^2 .

При допущенні про сферичну форму гранули (радіус r) у випадку постійності швидкості V_{op} вздовж радіуса $V_{op} = f(R) = const$ вираз (5.2) запишеться у вигляді

$$F_s = \psi \cdot \frac{\rho_{gas} V_{op}^2}{2} \cdot \pi r^2. \quad (5.4)$$

Сила тяжіння, що діє на гранулу:

$$F_g = m_{gr} \cdot g = \rho_{gr} \cdot g \cdot v_{gr} = \frac{4}{3} \cdot \pi \cdot r^3 \cdot \rho_{gr} \cdot g, \quad (5.5)$$

де m_{gr} – маса гранули, кг;

g – прискорення вільного падіння, м/с²;

ρ_{gr} – густина гранули, кг/м³;

v_{gr} – об'єм гранули, м³.

Підставивши у рівняння (5.1) вирази для визначення F_s (5.4) и F_g (5.5), отримаємо рішення відносно V_{op} :

$$V_{op} = 1,63 \cdot \sqrt{\frac{\rho_{gr} \cdot g \cdot r}{\psi \cdot \rho_{gas}}} \quad (5.6)$$

Виразимо значення V_{op} з рівняння витрати

$$V_{op} = \frac{Q}{\pi \cdot R^2}, \quad (5.7)$$

де Q – об'ємна витрата газу, м³/с.

Враховуючи, що для конічного гранулятора поточне значення радіуса робочого простору $R = Z \cdot \operatorname{tg} \varphi$, вираз (5.5) для $V_{op} = f(Z)$ набуде вигляду:

$$V_{op} = \frac{Q}{\pi \cdot Z^2 \cdot \operatorname{tg}^2 \varphi} \quad (5.8)$$

Підставивши (5.8) в ліву частину (5.6), вирішимо одержане рівняння відносно Z

$$Z = \sqrt{\frac{Q}{1,63 \cdot \pi \cdot \operatorname{tg}^2 \varphi \cdot \sqrt{\frac{\rho_{gr} \cdot g \cdot r}{\psi \cdot \rho_{gas}}}}} \quad (5.9)$$

Результати розрахунку висоти Z в залежності від кута розкриття конуса і розміру гранули для $Q=1$ м³/с наведено в додатку А.

Аналіз результатів теоретичних розрахунків за формулою (5.9) показує, що із збільшенням кута розкриття конуса фракція гранул займає меншу висоту в робочому просторі вихрового гранулятора зваженого шару. Застосування грануляторів з малим кутом розкриття конуса (до 40°) доцільно для процесів одержання багатошарових гранул при нанесенні плівок на різних висотних відмітках.

Апарати з кутом розкриття конуса більше 40° застосовні для отримання гранульованих одношарових добрив або гранул з особливими властивостями (наприклад, пористої, аміачної селітри). Це пояснюється тим, що товарний продукт характеризується широким фракційним складом. Фактично в апаратах з великим кутом розкриття конуса внаслідок класифікації отримують три фракції: товарну, велику (направляється на дроблення і повертається в апарат у вигляді ретуру) і дрібну (вловлюється в газоочисних апаратах і відправляється на приготування пульпи).

Висота розташування гранули заданого розміру в робочому просторі апарата визначається як $Z_1 = Z - Z_0$,

Значення R_0 визначається при сумісному вирішенні рівнянь (5.6) и (5.7) для гранули максимального розміру r_{\max} в полідисперсній системі

$$R_0 = \sqrt{\frac{Q}{1,63 \cdot \pi \cdot \sqrt{\frac{\rho_{gr} \cdot g \cdot r_{\max}}{\psi \cdot \rho_{gas}}}}}. \quad (5.10)$$

Результати розрахунку радіуса R_0 в залежності від кута розкриття конуса і розміру гранули наведено в додатку Б.

Після визначення R_0 знаходимо значення Z_0 як

$$Z_0 = R_0 / \operatorname{tg} \varphi. \quad (5.11)$$

Порівняльна характеристика конструкцій робочого простору вихрового гранулятора зваженого шару за різних умов наведена в додатку Б.

Отримані в результаті теоретичного розрахунку значення Z , R_0 , Z_0 і Z_1 дозволяють сконструювати ВГЗШ, в якому крім основного процесу буде відбуватися класифікація гранул на необхідну кількість фракцій із заданим проектувальником розміром фракції.

На основі розробленої математичної моделі після перетворень обчислено висоту робочого простору, на якій будуть перебувати гранули заданого розміру в разі зміни їх маси (за рахунок зволоження та подальшого висушування):

$$Z = \frac{1,584}{\operatorname{tg} \varphi} \sqrt{\frac{Q}{\sqrt{\frac{m \cdot (1+U) \cdot g}{\psi \cdot \rho_{gas} \cdot r_{gr}}}}} \quad (5.12)$$

де Q - витрата газового потоку;

m - маса гранули; U - вологовміст;

g - прискорення вільного падіння;

ψ - коефіцієнт аеродинамічного опору;

ρ_{gas} - густина газу;

r_{gr} - радіус гранули.

1.3 Застосування вихрових масообмінних контактних ступенів

У процесі проектування контактних ступенів для абсорбційного очищення газу основним питанням є скорочення бризковинесення та підвищення ступеню вловлювання компонентів газу з газової суміші. Від величини бризковинесення залежить ефективність проведення масообмінних процесів в межах контактної ступені. Аналіз роботи ситчатих, ковпачкових, клапанних і вихрових контактних пристроїв визначив найнижче значення бризковинесення при використанні вихрових контактних пристроїв. Наявність в таких контактних пристроях вузла завихрення газового потоку дозволяє змінювати параметри крутки, а також істотно впливати на гідравлічний опір контактного пристрою і величину бризковинесення рідкої фази з контактної ступені.

Сили, що діють на плівку рідини в вихровому газовому потоці (Рис. 5.3а): Сила тяжіння F_T ; відцентрова сила N ; сила тертя $F_{тр}$; сила аеродинамічного опору P ; гідростатична сила P_r .

Умовою мінімального бризковинесення рідини є баланс зазначених сил при досягненні рідиною плівкознімача, з якого визначається оптимальна висота масообмінно-сепараційного елемента (МСЕ). Оптимальний радіус МСЕ повинен забезпечувати максимальну швидкість руху газового потоку, при якій виконується умова балансу сил (Рис . 5.3б).

Сила тяжіння, яка сприяє рух рідини до нижнього перерізу контактного патрубка

$$F_T = mg, \quad (5.13)$$

де m – маса рідини, кг;

g – прискорення вільного падіння, м / с².

$$m = \pi CLR^2, \quad (5.14)$$

де C – кількість рідини в одиниці об'єму контактному патрубку МСЕ, кг/м³;

L – висота контактному патрубку МСЕ, м;

R – радіус контактному патрубку МСЕ, м.

$$C = m_{рп} / V_{п}, \quad (5.15)$$

де $m_{рп}$ – маса рідини в одному контактному патрубку МСЕ, кг;

$V_{п}$ – об'єм контактному патрубку МСЕ, м³.

$$V_{п} = \pi R^2 L. \quad (5.16)$$

Допускаючи, що рідина, що знаходиться на тарілці, рівномірно розподілена по всім контактним патрубкам МСЕ, маємо:

$$m_{рп} = m_p / n, \quad (5.17)$$

де m_p – маса рідини на полотні тарілки, кг;

n – число контактних патрубків МСЕ, шт (визначається конструктивно).

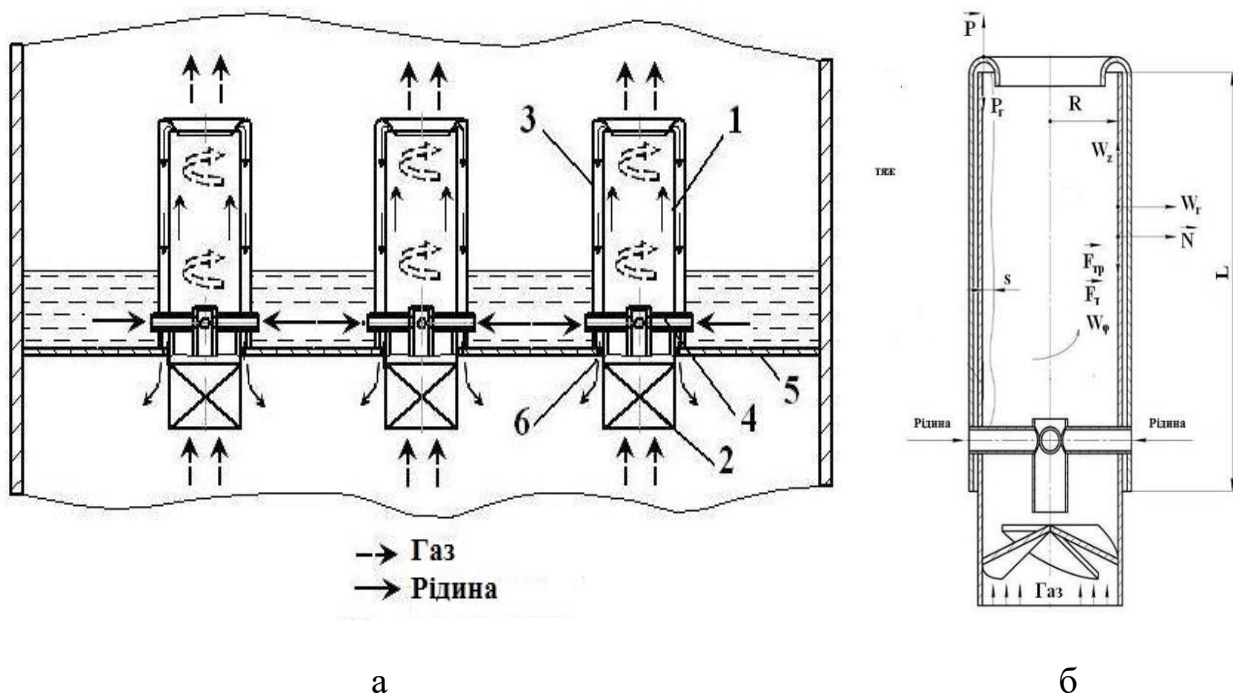


Рисунок 5.3 – Масообмінно-сепараційний елемент вихрової тарілки: а – розрахункова схема до аналізу силового впливу на плівку рідини; б – схема руху потоків газу і рідини; 1 – контактний патрубок; 2 – завихрювач; 3 – плівкознімач; 4 – трубка для подачі рідини; 5 – полотно тарілки; 6 – отвори для зливу рідини

$$m_p = V_p \rho_p, \quad (5.18)$$

де V_p – об'єм рідини на полотні тарілки, м^3 ;

ρ_p – густина рідини, $\text{кг} / \text{м}^3$.

$$V_p = F_p h_p, \quad (5.19)$$

де F_p – площа, яка займається рідиною на полотні тарілки, м^2 ;

h_p – висота шару рідини на полотні тарілки, м (визначається на підставі експериментальних досліджень).

Враховуючи, що рідина займає все полотно тарілки (переливні пристрої перебувають під плівкознімачем контактного патрубку МСЕ):

$$F_p = \pi (R_m^2 - R_{n.n}^2 n), \quad (5.20)$$

де R_T – радіус полотна тарілки, м;

$R_{п.н}$ – зовнішній радіус плівказнімача контактного патрубку МСЕ, м (визначається конструктивно).

Відцентрова сила відповідно до закону Ньютона

$$N = m \cdot a_n \quad (5.21)$$

де a_n – нормальне прискорення плівки рідини, м / с².

$$a_n = W_r^2 / R, \quad (5.22)$$

де W_r – радіальна складова швидкості руху плівки рідини, м / с.

Тоді

$$N = m W_r^2 / R. \quad (5.23)$$

Сила тертя згідно закону в'язкого тертя Ньютона

$$F_{тр} = \eta W_z / s, \quad (5.24)$$

де η – коефіцієнт тертя плівки рідини об стінку контактного патрубку МСЕ, Н·с;

W_z – осьова складова швидкості руху плівки рідини, м / с;

s – товщина плівки піднімається рідини в контактному патрубку МСЕ, м.

Рівняння збереження імпульсу для елементарного об'єму рідкого середовища:

$$d(mW^2) = P dt, \quad (5.25)$$

$$P = \frac{d(mW^2)}{dt} = \frac{2Wz dm}{dt}, \quad (5.26)$$

$$\frac{dm}{dt} = Wz \cdot 2 \cdot \pi \cdot R \cdot d \cdot \rho, \quad (5.27)$$

Таким чином:

$$P = 4\pi R d \rho_p W_z^2. \quad (5.28)$$

Сила P , з якою потік рідини піднімається вгору патрубку, врівноважується гідростатичною силою P_r . При $P > P_r$ рідина буде підніматися вгору, при цьому значення цієї сили має бути достатнім для того, щоб рідина зливалася через плівкознімач, не викликаючи значного бризковинесення. При $P < P_r$ рідина виводиться через нижній перетин контактної патрубку МСЕ без контакту з газовим потоком. Тому важливий баланс $P = P_r$.

Гідростатичний тиск відповідно до закону Паскаля:

$$p_r = \rho_p g L. \quad (5.29)$$

Якщо записати $dV = dF \cdot s$ і $dV = dm / \rho$, При цьому $dF = dm / (Ps)$ і $P = dN/dF$, то з (5.29) випливає

$$L = \frac{1}{\rho_p g} \frac{dN}{dF} = \frac{1}{\rho_p g} \frac{dN}{dm} \rho_p s = \frac{s}{g} \frac{dN}{dm}. \quad (5.30)$$

Враховуючи, що $dN/dm = W_\phi^2 / R$, де W_ϕ – колова складова швидкості руху плівки рідини, м/с

$$L = \frac{s}{g} \frac{W_\phi^2}{R}. \quad (5.31)$$

Товщина плівки рідини, що піднімається по внутрішній стінці контактної патрубку МСЕ

$$s = \frac{m}{2\pi L \rho_p R} = \frac{CL\pi R^2}{2\pi L \rho_p R} = \frac{1}{2} \frac{CR}{\rho_p}. \quad (5.32)$$

Для визначення оптимального режиму роботи вихрової тарілки проведено серію експериментальних досліджень.

В ході проведення експерименту спостерігалось 4 гідродинамічних режими протікання процесу масообміну:

1. Режим 1 (Рис. 5.4), при якому об'єм рідини, яка поступає в центральну частину масообмінного елемента з полотна тарілки через трубку, частково (у малому ступені) диспергується потоком газу (оскільки витрата газу незначна), а основний об'єм рідини зливається по внутрішній стінці контактної трубки масообмінного елемента. Потік газу, у свою чергу, проходить через центральну частину контактної трубки масообмінного елемента.

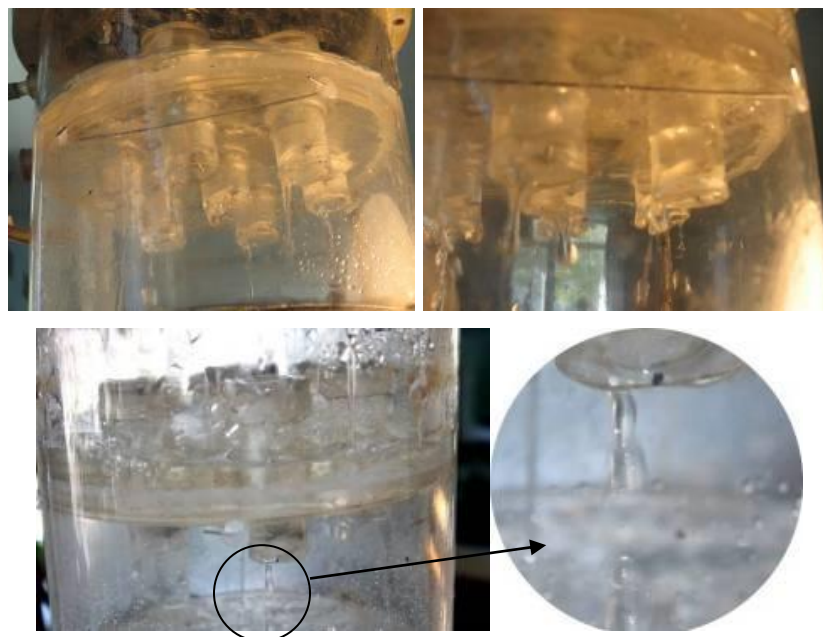


Рисунок 5.4 – Фотографії гідродинамічного режиму 1

Для даного режиму характерне утворення поодиноких бульбашок газу великого розміру в шарі рідини. Таким чином, площа зіткнення фаз не розвинена. Витрата рідини: $0,000005 \dots 0,000006 \text{ м}^3/\text{с}$; витрата газу: $0,0060 \dots 0,0063 \text{ м}^3/\text{с}$. Гідравлічний опір тарілки складає 20-40 Па.

2. Режим 2 (Рис. 5.5), при якому об'єм рідини, яка поступає в центральну частину масообмінного елемента з полотна тарілки через трубку, в значній мірі (в порівнянні з попереднім режимом) диспергується потоком газу, але частково рідина ще зливається по внутрішній стінці контактної трубки масообмінного елемента у вигляді крапель. Потік газу, у свою чергу, проходить через шар рідини

з інтенсивнішим (в порівнянні з попереднім режимом) вихроутворенням і утворенням бульбашок газу і піни. Таким чином, площа зіткнення фаз більш розвинена.

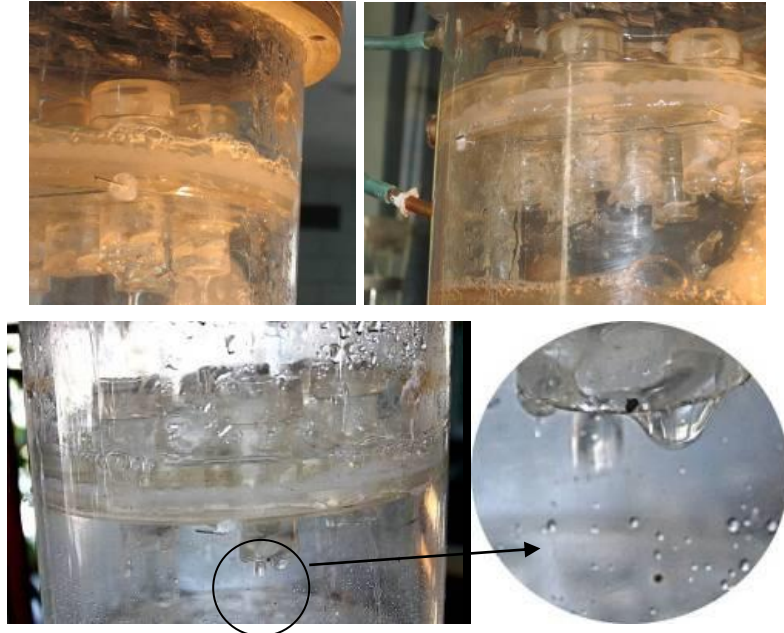


Рисунок 5.5 – Фотографії гідродинамічного режиму 2

Цей режим передує оптимальному режиму масообміну в прямоточно-відцентровому елементі. Витрата рідини: $0,000008...0,000009 \text{ м}^3/\text{с}$; витрата газу: $0,00615...0,00695 \text{ м}^3/\text{с}$. Гідравлічний опір тарілки складає 40-280 Па.

3. Оптимальний режим (Рис. 5.6), при якому об'єм рідини, яка поступає в центральну частину масообмінного елементу з полотна тарілки через трубку повністю диспергується потоком газу, злив рідини по внутрішній стінці контактної трубки масообмінного елементу відсутній. Потік газу проходить через шар рідини з інтенсивним вихроутворенням і утворенням дрібнодисперсних бульбашок газу і піни. Таким чином, площа зіткнення фаз найбільш розвинена. Витрата рідини: $0,0000020...0,0000029 \text{ м}^3/\text{с}$; витрата газу: $0,0076...0,0077 \text{ м}^3/\text{с}$. Гідравлічний опір тарілки складає 300-450 Па.



Рисунок 5.6 – Фотографії оптимального гідродинамічного режиму

4. Режим унесення (Рис. 5.7), при якому об'єм рідини, яка поступає в центральну частину масообмінного елемента з полотна тарілки через трубку диспергується у меншій мірі, ніж при оптимальному режимі, оскільки газ проходить через шар рідини у вигляді цівок.



Рисунок 5.7 – Фотографії гідродинамічного режиму унесення

Плівка рідини, яка відкидається відцентровими силами до внутрішньої стінки контактної трубки масообмінного елементу в результаті завихрювань потоку, захоплюється потоком газу і частково потрапляє в плівкоз'ємник разом з газовим потоком, але більша частина плівки рухається з потоком газу на вищерозташовану тарілку через центральний верхній отвір контактної трубки масообмінного елементу, не потрапляючи в плівкоз'ємник, тобто для даного режиму характерне підвищене бризкоунесення.

Таким чином, площа зіткнення фаз менш розвинена. Витрата рідини: $0,0000039 \dots 0,0000049 \text{ м}^3/\text{с}$; витрата газу: $0,0075 \dots 0,0078 \text{ м}^3/\text{с}$. Гідравлічний опір тарілки складає 480-510 Па.

Для додаткового дослідження гідродинамічних умов роботи вихрових тарілок застосовано комп'ютерне моделювання руху потоків за допомогою програмних продуктів COSMOS FlowWorks та Flow Vision, яке базується на методі вирішення рівнянь гідродинаміки за допомогою методу кінцевих об'ємів і використанні прямокутної адаптивної сітки з локальним подрібненням (Рис. 5.8).

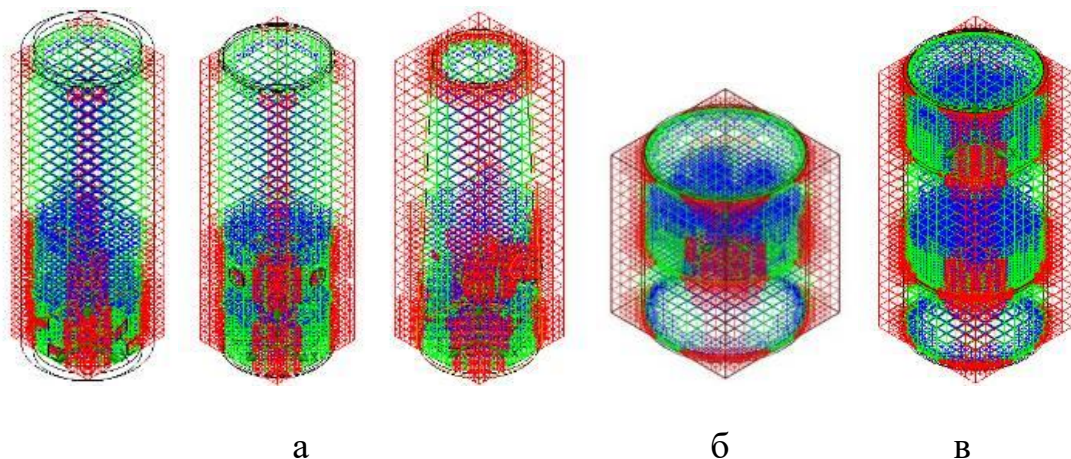


Рисунок 5.8 – Розрахункові сітки контактних ступенів: а – прямоточно-відцентрового елементу різної конструкції; б – тарілки з контактними елементами; в – каскад контактних тарілок

Рух газового потоку у масообмінно-сепараційному елементі

Приймаючи шорсткість стінки патрубку прямоточно-відцентрового елементу, граней завихрювача і поверхні трубки для подачі рідини Rz 40,

одержуємо розподіл швидкості руху газового потоку в циліндричному і конічному патрубках, зображений на рисунках 5.9 і 5.10 відповідно.

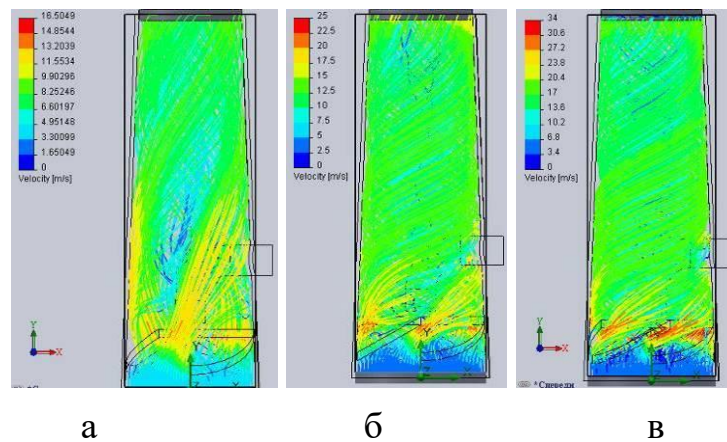


Рисунок 5.9 – Візуалізація полів швидкостей в конічному контактному елементі з завихрювачем, що складається з: а - 3 елементів; б - 4 елементів; в - 5 елементів

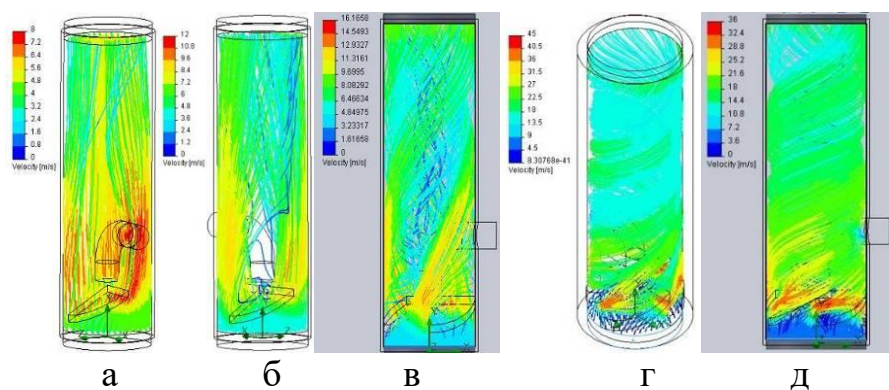


Рисунок 5.10 – Візуалізація полів швидкостей в циліндричному контактному елементі з завихрювачем, що складається з: а - 1 елементу; б - 2 елементів; в - 3 елементів; г - 4 елементів; д - 5 елементів

Рух газового потоку в межах вихрової тарілки

Заливки поля швидкостей руху газового потоку в межах вихрової тарілки представлено на рисунку 5.12.

Рух двофазного потоку

В результаті моделювання було доведено, що рідина, яка потрапляє в прямотечійно-відцентровий елемент через трубки, рухається донизу патрубку, де зустрічається з протилежно направленим потоком газу. За допомогою завихрювача потік газу та рідини закручується та під дією відцентрової сили,

рідина, як більш важка фаза, відкидається на стінки патрубку, і у вигляді плівки рухається вгору. Газовий потік виходить також через верхній переріз патрубка (Рис. 5.13).

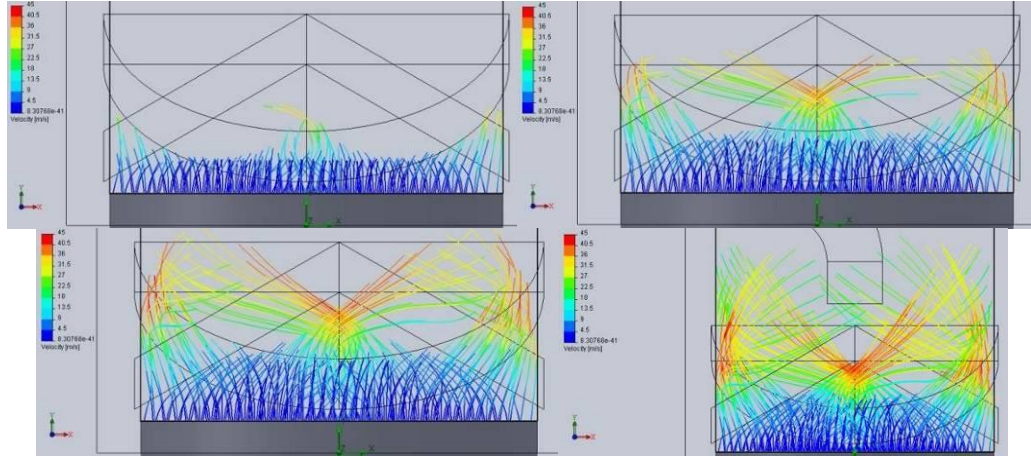


Рисунок 5.11 – Візуалізація зміни швидкості в контактному патрубку масообмінно-сепараційного елемента прямоточно-відцентрового типу

Як видно з рисунка, максимальної швидкості потік досягає в межах завихрювача. Це пов'язано з тим, конфігурація завихрювача передбачає інтенсивне закручування потоку, що, в свою чергу, збільшує швидкість.

У центрі патрубка швидкість дуже незначна, що дозволяє осідати рідині на стінки патрубка. Збільшення швидкості у верхньому перерізі елемента зменшує бризковинесення.

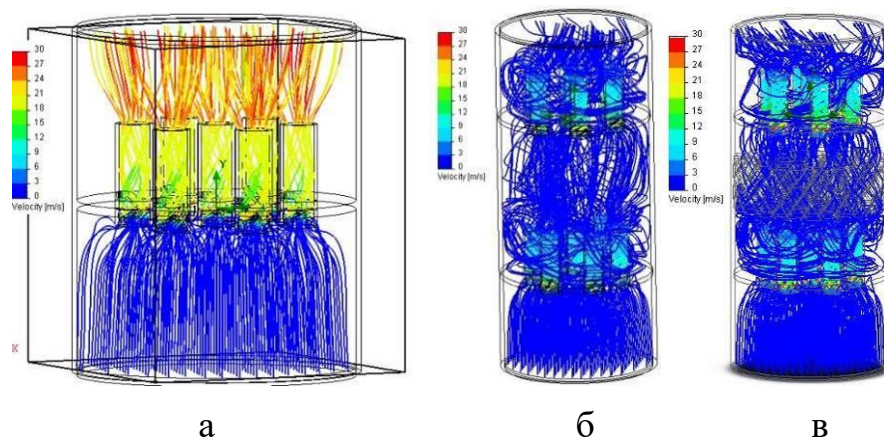


Рисунок 5.12 – Візуалізація зміни швидкості: а - на тарілці з прямоточно-відцентровими елементами; б - між тарілками з прямоточно-відцентровими елементами; в - між тарілками з прямоточно-відцентровими елементами у разі розміщення між тарілками шару структурованої насадки

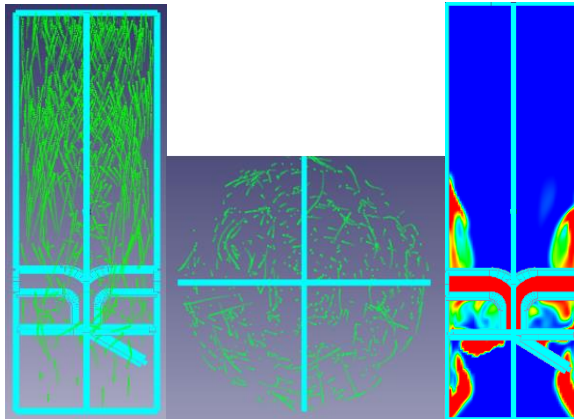


Рисунок 5.13 – Рух газорідного потоку всередині масообмінно-сепараційного елемента

Проведені дослідження дозволяють провести проектування вихрового ступеню очищення відхідних газів з вихрового гранулятора з підбором оптимальної його роботи

5.4 Застосування вихрових сепараторів

При проведенні процесу одержання гранул пористої структури, зокрема, пористої аміачної селітри, в вихрових апаратах спостерігається інтенсивне пилоутворення внаслідок виносу високодисперсних твердих частинок аміачної селітри, які несуться з газовим потоком з верхньої частини апарату. Наслідком цього є виникнення потенційних шкідливостей і небезпек під час функціонування вихрового гранулятора. Таким чином, рішення задачі усунення можливого викиду в атмосферу пилового потоку є актуальним завданням і потребує вирішення.

Для вирішення поставленого завдання запропоновано застосування інерційно-фільтруючої вихрової сепараційної секції (рисунок 5.14), якою обладнана верхня частина вихрового гранулятора, що є найбільш доцільним внаслідок використання для створення оптимальної гідродинамічної обстановки процесів очищення (сепарації, фільтрування та абсорбції) енергії вихрового потоку, раніше сформованого в процесі гранулювання.

Інерційно-фільтруюча вихрова сепараційна камера з пінним водоповітряним шаром дозволяє вловлювати всі види пилу (абразивний, електропро-відний, волоконний, вологий тощо), бризки, шлами.

Газоочисниках є інтенсивно спінений шар води, яка одночасно успішно грає роль абсорбенту домішок аміаку з газової суміші. Тому в камері уловлюються не тільки частинки пилу та інші забруднювачі, але й шкідливі гази (аміак), що дозволяє очищати гази від домішок шкідливих газів до значень гранично допустимих концентрацій. Побічна корисна властивість - зволоження повітря виробничих приміщень (до 100%), що в запилених приміщеннях не зайве.

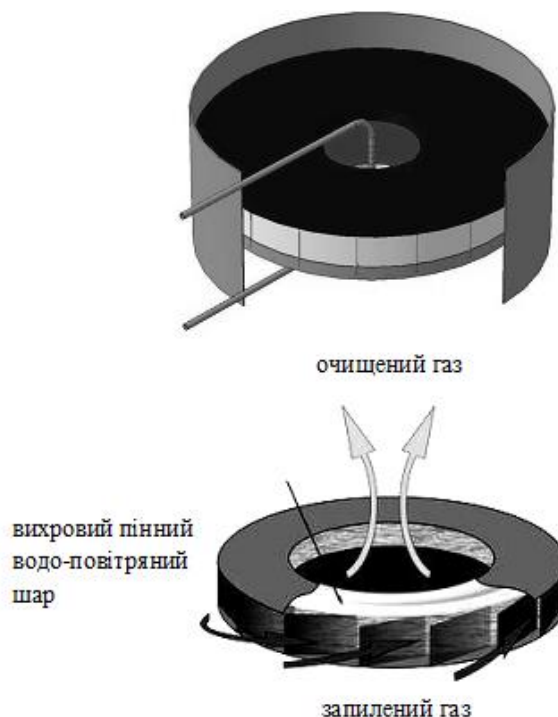


Рисунок 5.14 – Сепараційна камера

Застосована сучасна технологія очищення газу завдяки застосуванню різних механізмів уловлювання (інерційна сепарація, гідрофільтрування, абсорбція) і декількох ступенів уловлювання дозволяє досягти необхідних показників екологічності виробництва. Крім того, висока ступінь уловлювання високодисперсних твердих частинок пилу, бризок пульпи, і газових домішок, а також низьке значення показника їх виносу підвищує ступінь використання

сировини (розчину аміачної селітри) при проведенні процесу одержання гранул пористої структури.

Процес комп'ютерного моделювання включає створення 3D моделей сепараційних секцій (Рис. 5.15), а також розрахункове моделювання та візуалізацію гідродинамічних характеристик потоків у них за допомогою сучасних CAD \ CAE систем.

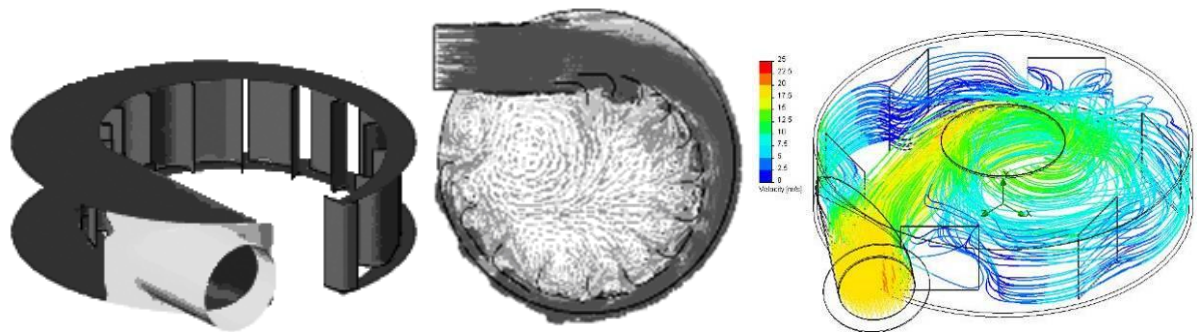


Рисунок 5.15 – Модель сепараційної секції і результати комп'ютерного моделювання гідродинаміки газового потоку в секції

Комп'ютерне моделювання сепараційних секцій дозволить підвищити ефективність видалення з газу, що відходить, крапель перед входом в масообмінну секцію і рідкого поглинача після виходу з масообмінних секцій.

1.5 Екологічна оцінка роботи вихрових грануляторів

Порівняльний аналіз гранулометричного складу продукту, отриманого із застосуванням існуючих грануляторів зваженого шару і малогабаритних вихрових апаратів різного конструктивного виконання (Рис. 5.16, 5.17) показав, що більшим ступенем монодисперсності володіє продукт, отриманий із застосуванням вихрових грануляторів.

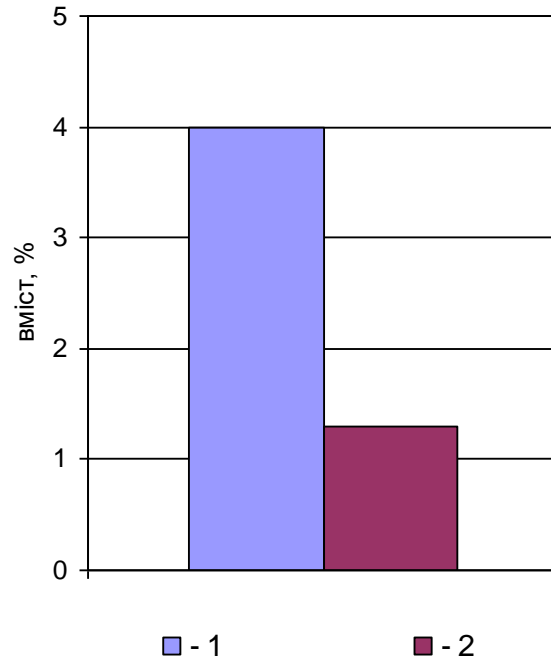


Рисунок 5.16 - Масова доля гранул розміром більше 3,0 мм в готовому продукті: 1 - гранулятор з класичним зваженим шаром; 2 - вихровий гранулятор

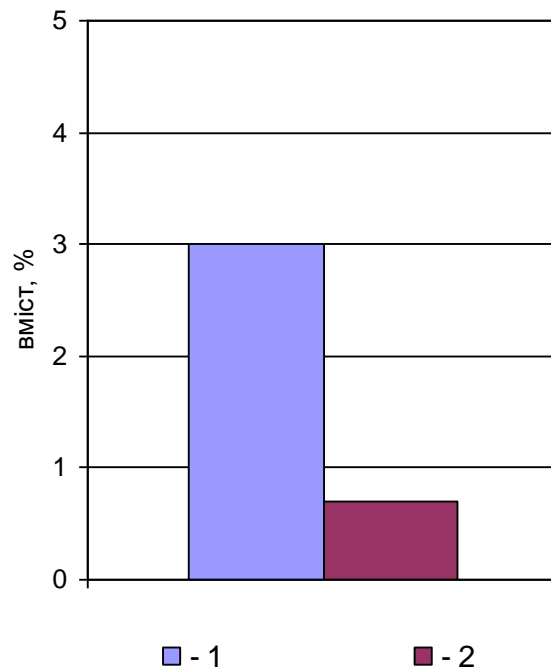


Рисунок 5.17 - Масова доля гранул розміром менше 1,0 мм в готовому продукті: 1 - гранулятор з класичним зваженим шаром; 2 - вихровий гранулятор

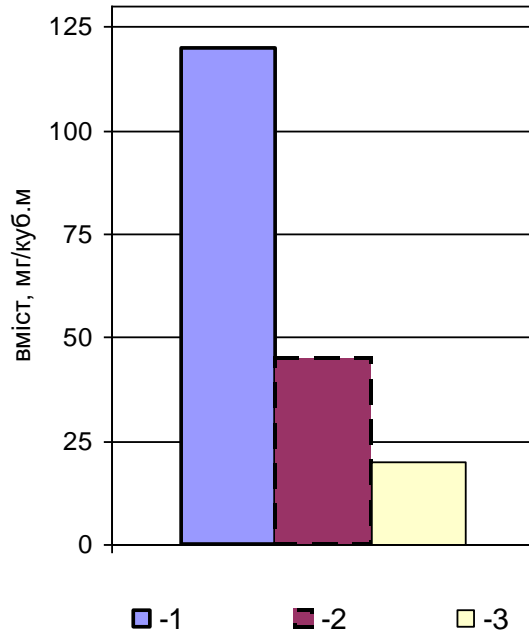


Рисунок 5.18 - Середній вміст пилу аміачної селітри в відхідному з гранулятора повітрі: 1 - гранулятор з класичним зваженим шаром; 2 - вихровий гранулятор; 3 - вихровий гранулятор з сепараційною секцією

Аналіз складу газу на виході з вихрового гранулятора (Рис. 5.18) показав перевагу апаратури такого типу перед грануляторами з класичним псевдозрідженим шаром. Додаткова установка сепараційних пристроїв значно знижує вміст пилу у відхідних газах.

6 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 [41].

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 [42].

Розглянемо поверхневу і внутрішню структуру гранули аміачної селітри (Рис. 6.1, 6.2).

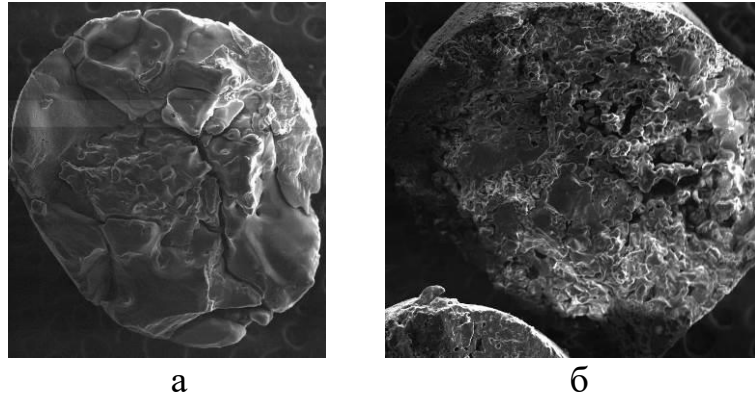


Рисунок 6.1 – Структура вихідної гранули аміачної селітри (а) і гранули пористої аміачної селітри після зволоження і термообробки (б)

Гранули аміачної селітри до зволоження і термообробки (Рис. 6.1 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. 6.1 б) мають в своєму обсязі різні види пор, які утворилися в результаті випаровування і виходу аміаку вологи з гранули.

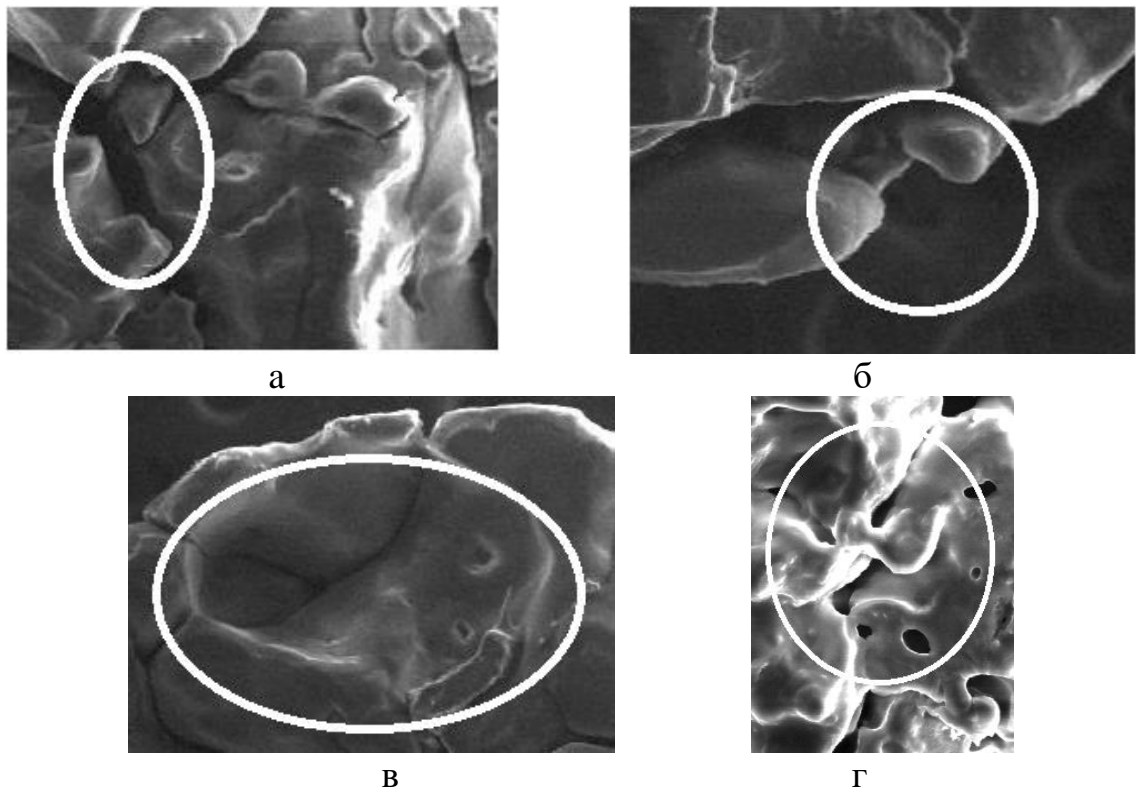


Рисунок 6.2 – Види пір в структурі аміачної селітри: тріщини (а), відколи (б), каверни (в), канали (г)

Експериментальні дослідження дозволили виділити в структурі гранули аміачної селітри такі види пор (Рис. 6.2) [43, 44]:

- тріщини (Рис. 6.2а);
- відколи (Рис. 6.2б);
- каверни (Рис. 6.2в);
- канали (Рис. 6.2г).

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 [45].

Гідродинамічні умови створення гранул пористої структури [46, 47].

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. 6.3-6.7.

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.

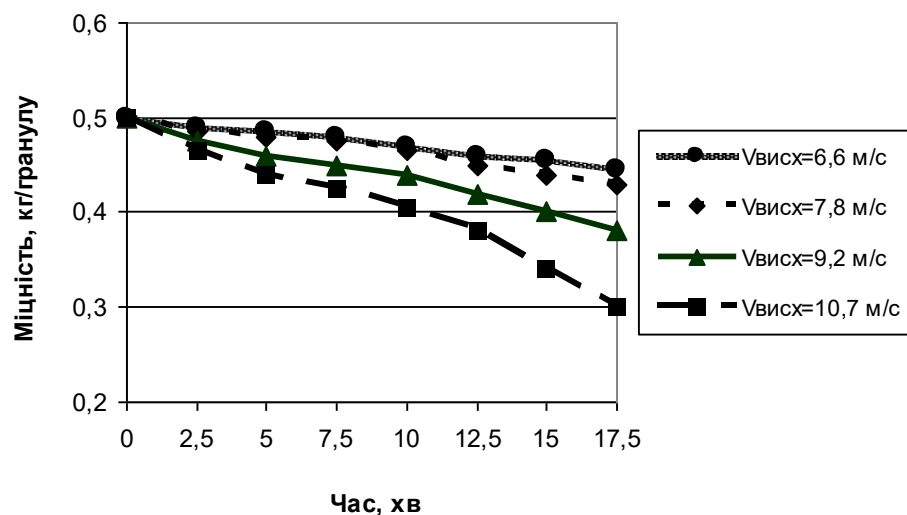


Рисунок 6.3 – Вплив висхідній швидкості сушильного агента $V_{\text{висх}}$ на міцність гранул (при значенні колової швидкості сушильного агента $V_{\text{кол}}=5,2$ м/с і температурі термообробки $t=90$ °С)

Значення колової швидкості сушильного агента чинить істотний вплив на міцність гранул (Рис. 6.4). 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. 6.5).

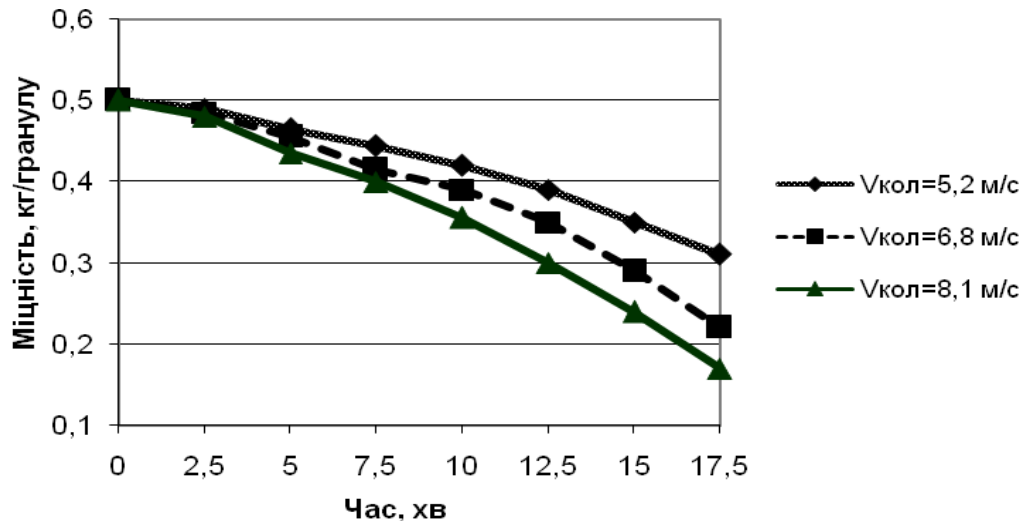


Рисунок 6.4 – Вплив колової швидкості сушильного агента $V_{\text{кол}}$ на міцність гранул (при значенні висхідної швидкості сушильного агента $V_{\text{висх}}=7,8$ м/с і температурі термообробки $t=90$ °С)

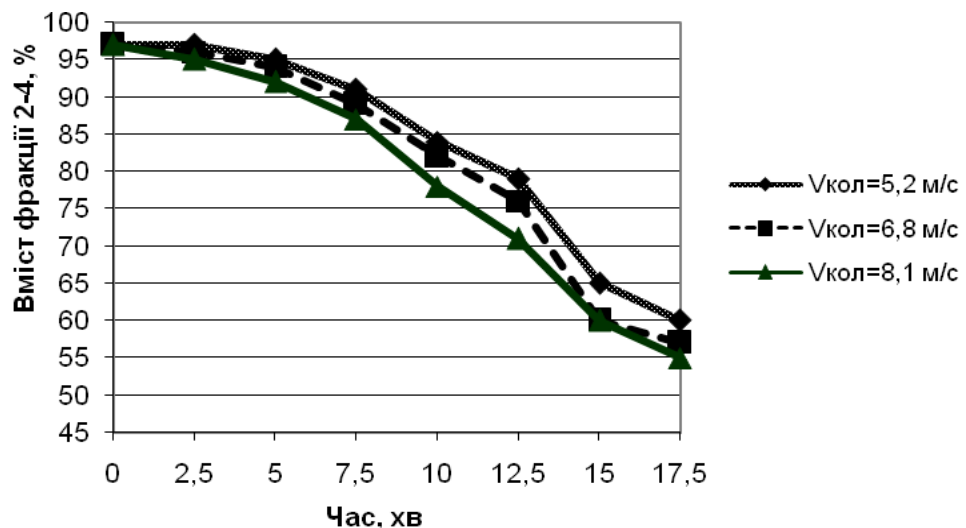


Рисунок 6.5 – Вплив колової швидкості сушильного агента $V_{\text{кол}}$ на кількість товарної фракції (при значенні висхідної швидкості сушильного агента $V_{\text{висх}}=1$ м/с і температурі термообробки $t=90$ °С)

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

Оцінка впливу гідродинамічних параметрів на поглинальну здатність гранул ПАС (Рис. 6.6) 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. 6.7) 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.

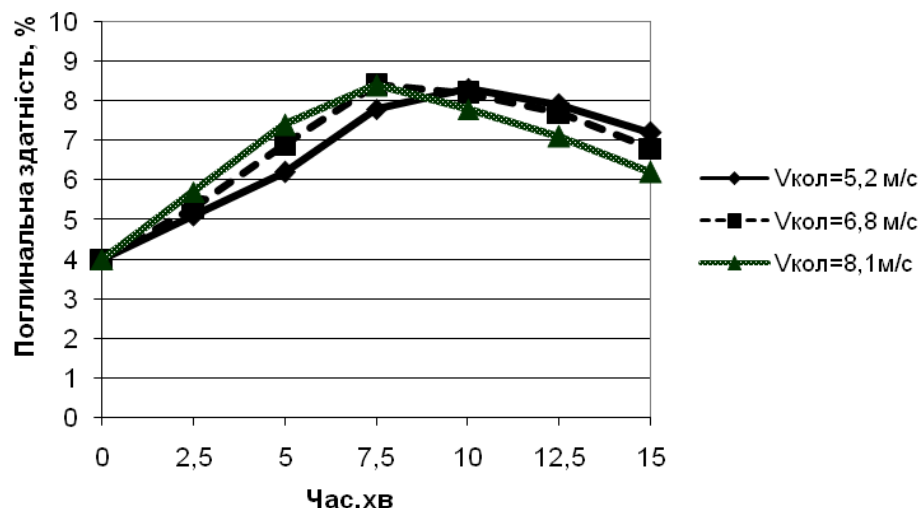


Рисунок 6.6 – Вплив колової швидкості сушильного агента $V_{\text{кол}}$ на поглинальну здатність гранул (при значенні висхідної швидкості сушильного агента $V_{\text{висх}}=7,8$ м/с і температурі термообробки $t = 90$ °C)

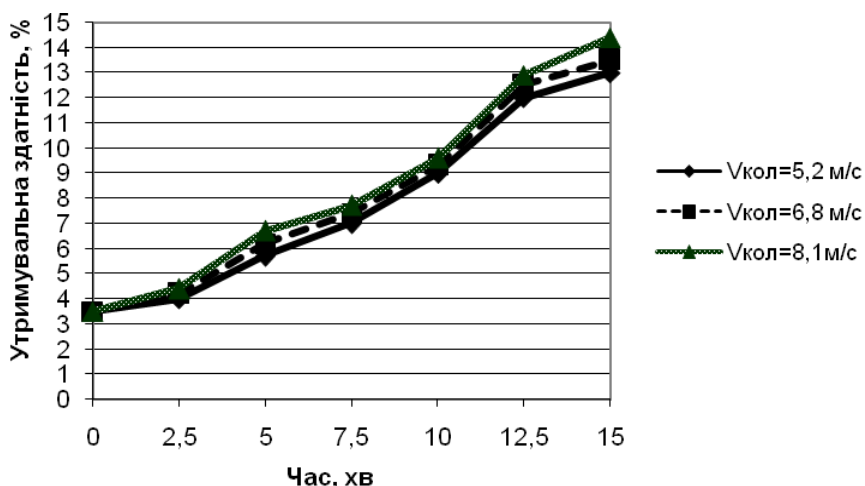


Рисунок 6.7 – Вплив колової швидкості сушильного агента $V_{\text{кол}}$ на утримувальну здатність гранул (при значенні висхідної швидкості сушильного агента $V_{\text{висх}}=7,8 \text{ м/с}$ і температурі термообробки $t=90 \text{ }^\circ\text{C}$)

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 [46, 48-50].

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. 6.8, 6.9, 6.11, 6.12. 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 вологи в гранулах ПАС вище нормативного показника.

Монотонне зменшення кількості товарної фракції ПАС при збільшенні температури (рис. 6.8) 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. 6.9), що знижує ступінь монодисперсності готового продукту.

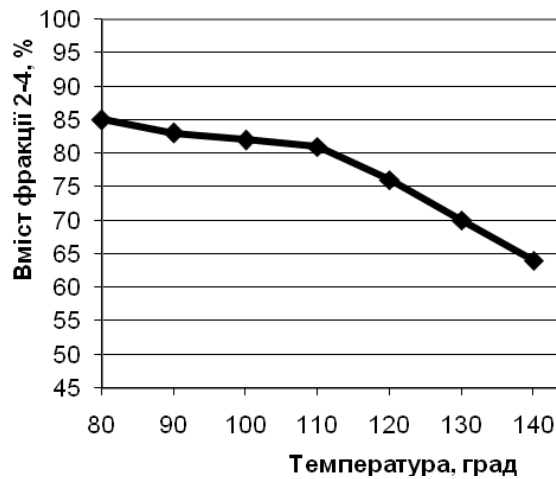


Рисунок 6.8 – Вплив температури термообробки t на кількість товарної фракції (при значенні часу перебування гранул в апараті 10-12 хвилин)

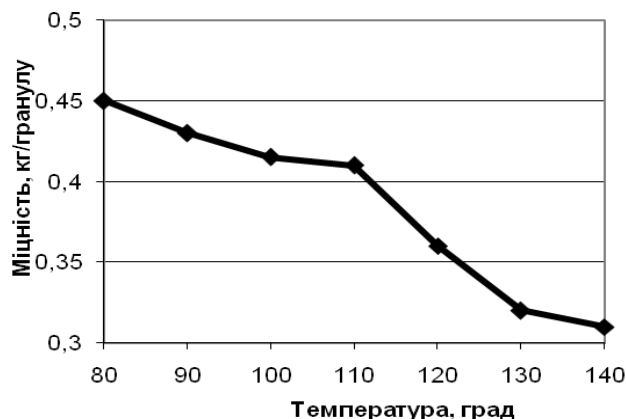


Рисунок 6.9 – Вплив температури термообробки t на міцність гранул (при значенні часу перебування гранул в апараті 10-12 хвилин)

Результати Раман-аналізу структури ПАС (Рис. 6.10) показали, що вона зі-відповідає модифікації II [51]. Після зволоження і термообробки в структурі гранули ПАС відсутні нові сполуки, кристалічна решітка гранули відповідає заявленій модифікації.

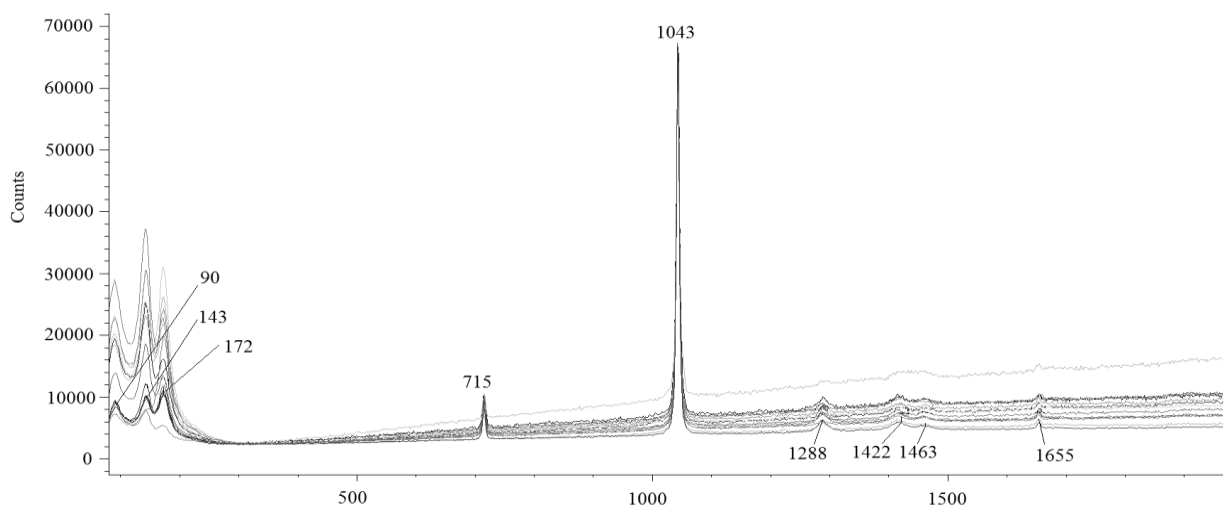


Рисунок 6.10 – Результати Раман-аналізу зразка гранули

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. 6.11).

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. 6.12), 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.

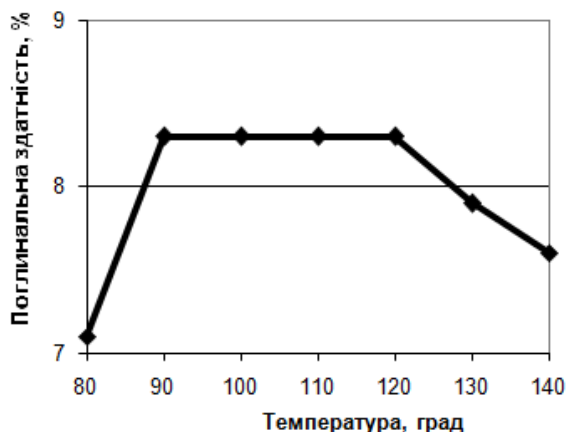


Рисунок 6.11 – Вплив температури термообробки t на поглинальну здатність гранул (при значенні часу перебування гранул в апараті 10-12 хвилин)

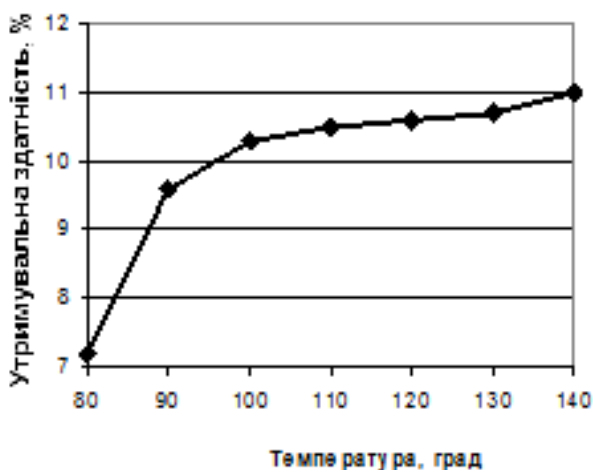


Рисунок 6.12 – Вплив температури термообробки t на утримувальну здатність гранул (при значенні часу перебування гранул в апараті 10-12 хвилин)

Вплив способу зволоження і типу зволожувача на структуру і якість гранул [52-54].

Результати досліджень, які представлені в табл. 6.1, 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 6.1 – 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 [55-57]	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 [55, 57] або багатостадійною [56] 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. 6.13.

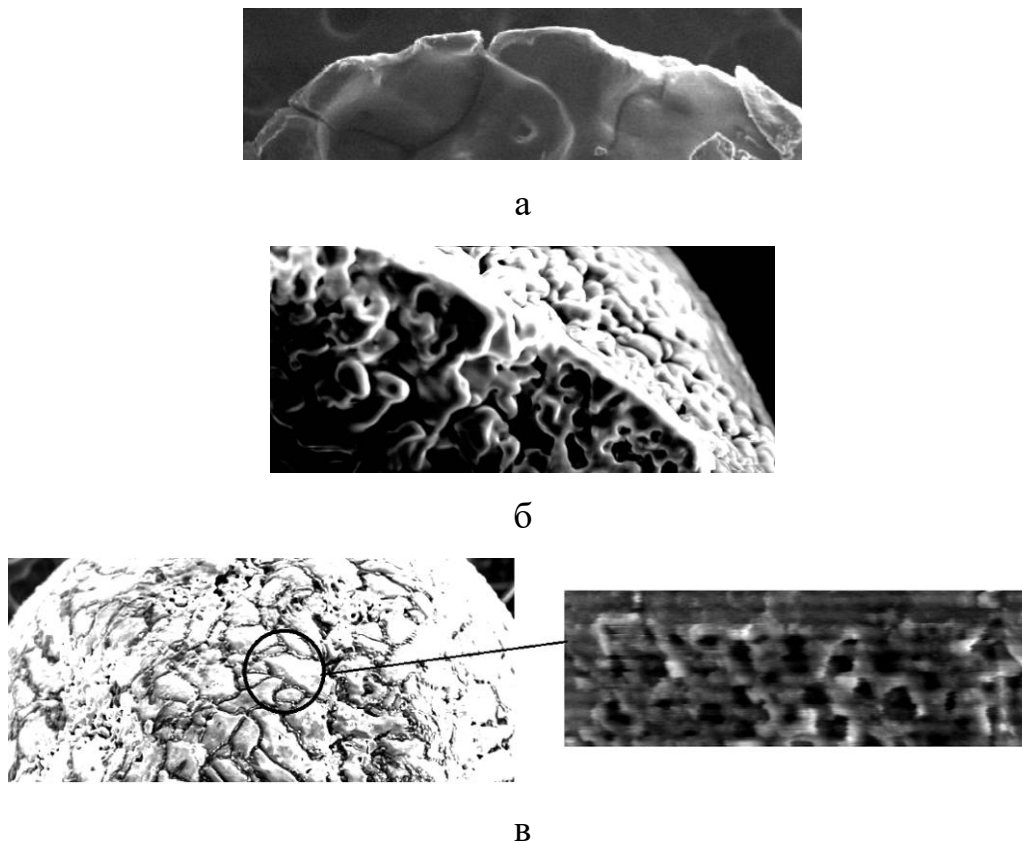


Рисунок 6.13 – Структура гранул аміачної селітри: а - поверхневий шар сухої гранули (аміачна селітра до зволоження); б - поверхневий шар гранули після зволоження і термообробки; в - гранула після зволоження і термообробки з дизельним паливом на поверхні і в порах

Незалежно від способу зволоження на поверхні гранул утворюються характерні ділянки, які показані на рис. 6.14. 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.

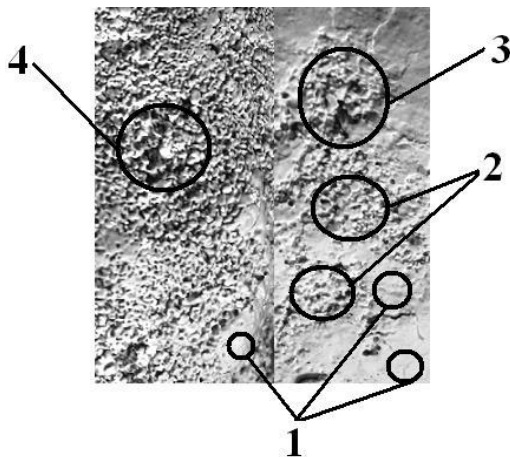


Рисунок 6.14 – Основні ділянки на поверхні гранули ПАС: 1 - ділянка без пор; 2 - ділянка з поверхневими порами; 3 - ділянка з порами малої глибини; 4 - ділянка з глибокими порами

Результати, які наведені в табл. 6.2, 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.

Поглиняльна 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 поглиняльну 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 6.2 – Вплив типу зволожувача на якість гранул (попереднє зволоження за способом [55-57]).

Тип зволожувача	Міцність, кг/гранулу	Поглиняльна 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 [41, 44-46].

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 6.15 – 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. 6.15-6.18) 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. 6.16-6.17). 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.

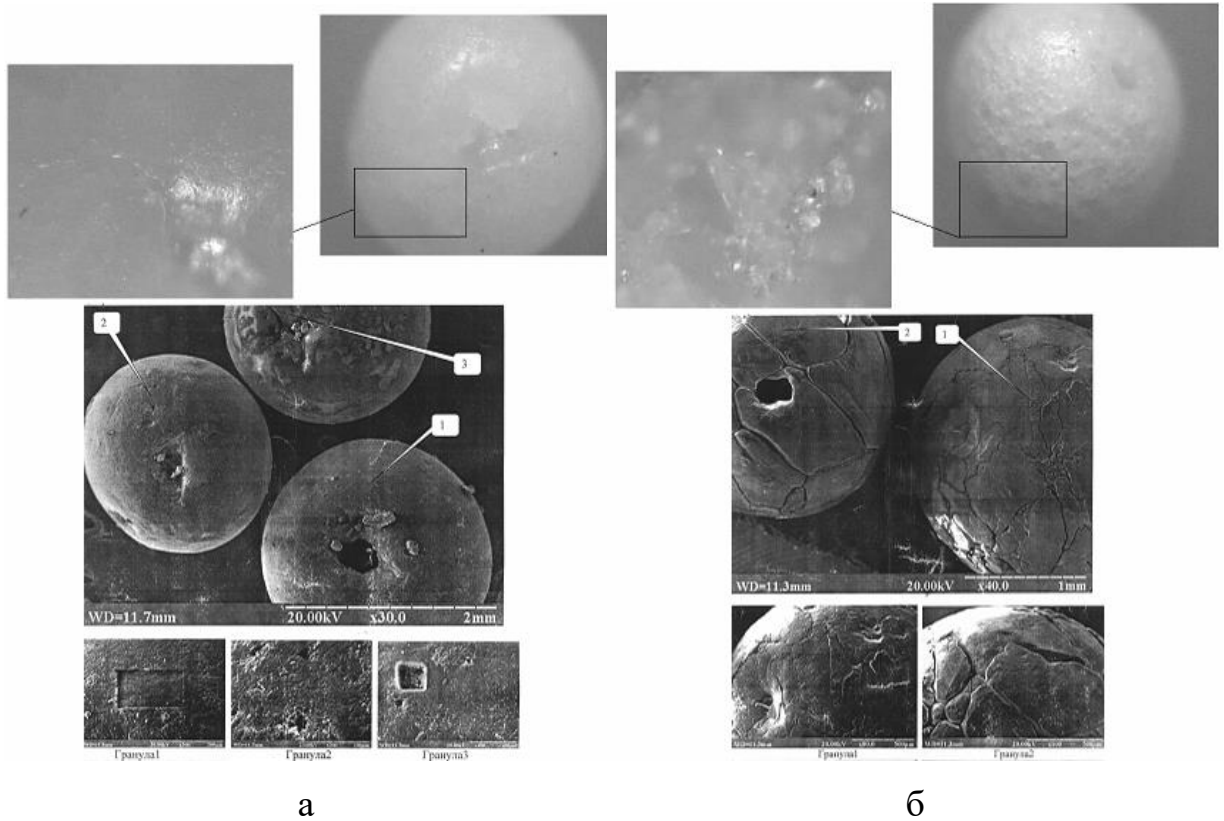


Рисунок 6.16 – Результати аналізу ПАС, яку отримано безбаштовим методом. В якості ретур використані гранули аміачної селітри виробництва «Рівне АЗОТ», м. Рівне(а) та «Дніпро АЗОТ», м. Сєверодонецьк (б)

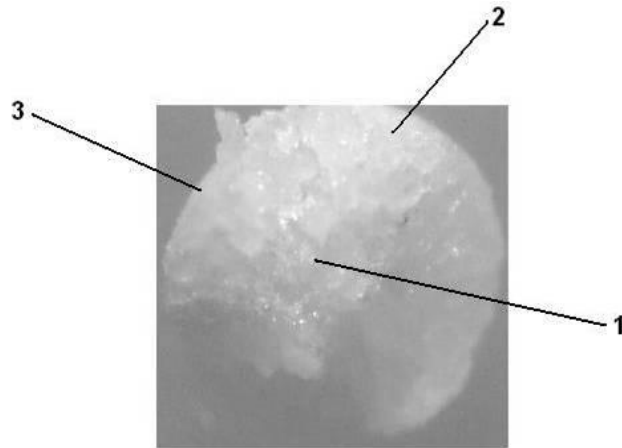


Рисунок 6.17 – Структура гранули, яку отримано за способом [27-29]: 1 – ядро гранули; 2 – перехідний шар; 3 – поверхневий пористий шар

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

При виконанні НДР були отримані наступні *наукові та прикладні результати*:

– знайшла подальшого розвитку математична модель розрахунку гідродинамічних параметрів однофазного та двофазного потоків в вихрових грануляторах;

– на основі експериментальних досліджень встановлено вплив конструкції гранулятора та технологічних параметрів потоків на інтенсивність гранулювання і якість гранул. Показано, що за рахунок раціонального підбору конструктивних елементів вихрового гранулятора стає можливим забезпечити мінімально необхідний час зневоднення гранул без їх руйнування;

– визначено оптимальні гідродинамічні та термодинамічні умови сушіння в багатоступеневих поличних апаратах, при яких видаляється задана кількість вологи при збереженні характеристик міцності та монодисперсності гранульованого продукту;

– теоретично описано та експериментально досліджено процеси тепломасообміну при здійсненні гранулюванні у вихрових грануляторах та сушіння в багатоступеневих поличних апаратах;

– запропоновано нові способи утилізації відходів грануляційних установок та проведені експериментальні дослідження з визначення їх ефективності;

– розроблено методики інженерного розрахунку грануляторів з активними гідродинамічними режимами та багатоступеневих сушарок;

– на основі авторських математичних моделей створено пакет прикладних програм для розрахунку основних показників роботи грануляційного та сушильного обладнання.

Практична значимість отриманих результатів.

Створено дослідно-промисловий зразок вихрового гранулятора для одержання гранульованої продукції. Одержано зразки гранульованої продукції

(комплексних мінеральних добрив, гранул, капсульованих органічною оболонкою та гранул пористої аміачної селітри), які передані потенційним замовникам (ДНДІ ХП, ТОВ "Аграрник", ТОВ «Е.М.А.»). В рамках проведення спільних науково-дослідних та дослідно-конструкторських робіт і впровадження їх результатів у виробництво на матеріально-технічній базі ПАТ УКРХІМПРОЕКТ в науково-навчальному Центрі комплексного інжинірингу «SSUChemTech» (створений спільно з кафедрою «Процеси та обладнання хімічних і нафтопереробних виробництв») розпочата серія дослідно-конструкторських робіт з проектування грануляційних установок із застосуванням апаратів з активними гідродинамічними режимами. Результати НДР було впроваджено при виконанні господарчого договору «Наукове обґрунтування вибору оптимального апаратного оформлення малогабаритної мобільної установки капсулювання мінеральних добрив». Одержано 8 патентів (нові способи гранулювання, обладнання для їх здійснення, промислові зразки грануляторів) та 5 авторських свідоцтв на програмні продукти та методики розрахунків.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

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. Urea Casale S.A. [Електронний ресурс]. Режим доступу: <http://www.casale.ch/>.
 13. Прандтль Л. Гидроаэромеханика / Прандтль Л.; пер. с нем. Г.А. Вольперта. – Ижевск: НИЦ РХН, 2000. – 576 с.
 14. Гольдштик М.А. Вихревые потоки / Гольдштик М.А. – Новосибирск: Наука, 1981. – 366 с.
 15. Жеба, К.В. Гідродинаміка двофазних вихрових потоків. Вплив на габарити грануляційного обладнання / К.В. Жеба, В.І. Склабінський, А.Є. Артюхов // Хімічна промисловість України. – Київ, 2009. – №4. – С. 47-52.

16. Artyukhov A.E., Obodiak V.K., Boiko P.G., Rossi P.C. Computer modeling of hydrodynamic and heat-mass transfer processes in the vortex type granulation devices // CEUR Workshop Proceedings. – 2017. – 1844. – P. 33-47.
17. Artyukhov A.E., Sklabinskiy V.I. Investigation of the temperature field of coolant in the installations for obtaining 3d nanostructured porous surface layer on the granules of ammonium nitrate // Journal of Nano- and Electronic Physics. – 2017. – 9, No. 1. – P. 01015-1 - 01015-4.
18. Патанкар С. Численные методы решения задач теплообмена и динамики жидкости: пер. с англ. – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 152 с.
19. Lipsanen T. Process analytical technology approach on fluid bed granulation and drying: identifying critical relationships and constructing the design space. – Helsinki: University Printing House, 2008. – 51 p.
20. Artyukhov A.E., Sklabinskiy V.I. Application of vortex three-phase separators for improving the reliability of pump and compressor stations of hydrocarbon processing plants / IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, Vol. 233, Is. 1, 2017, Article number 012014.
21. Kudra T. Advanced Drying Technologies / T. Kudra, A. S. Mujumdar – New York: Marcel Dekker, 2002. – 459 p.
22. Erode G. M. Ammonium Nitrate Explosives for Civil Applications: Slurries, Emulsions and Ammonium Nitrate Fuel Oils / G. M. Erode. – Weinheim: Wiley-VCH Verlag & Co, 2013. – 230 p.
23. Levchenko D.O., Artyukhov A.E., Yurko I.V. Maisotsenko cycle applications in multi-stage ejector recycling module for chemical production / IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, Vol. 233, Is. 1, 2017, Article number 012024.
24. Artyukhov A., Artyukhova N., Ivaniia A., Galenin R. Progressive equipment for generation of the porous ammonium nitrate with 3D nanostructure / Proc. Int. Conf. NAP-2017, Vol. 6 No 3, 03NE06.

25. Buczkowski D. Detonation Properties of Mixtures of Ammonium Nitrate Based Fertilizers and Fuels / D. Buczkowski, B. Zygmunt // Central European Journal of Energetic Materials. – 2011. – Vol.8. – No. 2. – pp. 99-106.
26. Artyukhov A., Voznyi A. The meso- and macropores generating process via modification of NH_4NO_3 granules: thermodynamic regime impact on the granule structure / Proc. Int. Conf. NAP-2017, Vol. 6 No 3, 03NEA09.
27. Artyukhov A., Ivaniia A. Experimental and industrial introduction of the improved devices to generate NH_4NO_3 granules with nanoporous structure / Proc. Int. Conf. NAP-2017, Vol. 6 No 3, 03NE10.
28. Zygmunt B. Influence of Ammonium Nitrate Prills' Properties on Detonation Velocity of ANFO / B. Zygmunt, D. Buczkowski // Propellants, Explosives, Pyrotechnics. – 2007. – Vol.32. – Is. 5. – pp. 411-414.
29. Short M. Simulation of Detonation of Ammonium Nitrate Fuel Oil Mixture Confined by Aluminum: Edge Angles for DSD / M. Short, J. J. Quirk, C. B. Kiyanda, S. I. Jackson, M. E. Briggs, M.A. Shinas // Proceedings of the 14th International Detonation Symposium.
30. Crowe C.T. Multiphase flow handbook / New York: Taylor & Francis Group, LLC, 2006. – 1128 p.
31. 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 Technologies, Vol 4, No 1 (88), pp. 4-10.
32. Artyukhov A.E., Vorobiov S.I. Phase Composition and Crystal Structure of N_4HNO_3 Granules with Nanostructured Surface Porous Layer Journal of Nano- and Electronic Physics. – 2017. – 9, No. 6. –P. 06018-1 - 06018-4.
33. K. Hiltunen, A. Jasberg, S. Kallio, H. Karema, M. Kataja, A. Koponen, M. Manninen, V. Taivassalo. Multiphase Flow Dynamics: Theory and Numerics. – VTT Technical Research Centre of Finland, Edita Prima Oy. – 124 p.
34. L. Marrone, A. Scotto. New Technology for Urea Solidification: Vortex Granulator & Vibrating Skin Bucket / The Casale 3rd Customer Symposium, 2011, paper No. 4.3, 11 p.

35. Lipsanen T. Process analytical technology approach on fluid bed granulation and drying: identifying critical relationships and constructing the design space. – Helsinki: University Printing House, 2008. – 51 p.
36. Artyukhov A., Artyukhova N., Ivaniia A., Gabrusenoks J. Multilayer modified NH₄NO₃ granules with 3D nanoporous structure: effect of the heat treatment regime on the structure of macro- and mezopores / Proc IEEE International Young Scientists Forum on Applied Physics and Engineering (YSF-2017). – pp. 315-318.
37. Artyukhov A., Sklabinskiy V., Ivaniia A. Electrical intelligent system for controlling the formation of monodisperse droplets in granulation devices based on magnetostrictive actuator / Proc. IEEE International Conference “Modern Electrical and Energy Systems” (MEES 2017). – pp. 280-283.
38. Kudra T. Advanced Drying Technologies / T. Kudra, A. S. Mujumdar – New York: Marcel Dekker, 2002. – 459 p.
39. Artyukhov A.E. Internal Recycled Particles Circulation in Vortex Granulator / Chemical and Petroleum Engineering. – Vol 53, Is 7–8. – pp. 423-429.
40. Атаманюк В. М. Наукові основи фільтраційного сушіння дисперсних матеріалів / В. М. Атаманюк, Я. М. Гумницький. – Львів: Видавництво Львівської політехніки, 2013. – 276 с.
41. 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.
42. 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.
43. 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).

44. 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.
45. 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.
46. Артюхов, А.Е. Опытное-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.
47. Склабинський, В.І. Перспективи застосування малогабаритних вихрових апаратів у виробництві гранул з особливими властивостями / В.І. Склабинський, А.Є. Артюхов // *Наукові дослідження – теорія та експеримент - 2009: матеріали П'ятої Міжнародної науково-практичної конференції.* – Полтава, 2009. –Т.8. – С. 92-94.
48. 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).*
49. 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.
50. 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.
51. H.C. Tang, V.H. Torrie, *J. Phys. Chem. Solids* 38, 125 (1977).

52. 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).
53. 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.
54. 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.
55. 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.
56. 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.
57. 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.