

УДК 66.099

№ держреєстрації 0121U109465

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-ТЕХНІЧНУ РОБОТУ

за договором від 04.03.2021 року № ДЗ/100-2021 та додатковою угодою № 1 від 27.09.2021 р.

**РОЗРОБЛЕННЯ ВИХРОВОГО ГРАНУЛЯТОРА ДЛЯ ОДЕРЖАННЯ ГРАНУЛ
ПОРИСТОЇ АМІАЧНОЇ СЕЛІТРИ**

(остаточний)

Науковий керівник НТР

канд. техн. наук, доцент, старший дослідник

А.Є. Артюхов

2021

Рукопис закінчено 13 грудня 2021р.

Результати роботи розглянуті науковою радою Сумського державного університету,

протокол № 6 від 14.12.2021 р.

СПИСОК АВТОРІВ

Науковий керівник НТР

канд. техн. наук, доц.,

старший дослідник

А.Є. Артюхов

(розд. 2, 4, 5, 6, 9 висновки)

Молодший науковий співробітник

А.С. Манжаров

(вступ, розд. 1, 3)

Провідний науковий співробітник

д-р техн. наук, проф.

В.К. Лукашов

(розд. 1, 2)

Старший науковий співробітник

канд. техн. наук, доц.

В.К. Ободяк

(розд. 7, 8)

Молодший науковий співробітник

канд. фіз.-мат наук, доц.

В.О. Журба

(розд. 1, 7, реферат)

РЕФЕРАТ

Звіт про науково-технічну роботу: 160 с., 99 рис., 3табл., 49 джерел.

Об'єкт дослідження – процеси отримання гранул з особливими властивостями в грануляційних пристроях вихрового типу.

Мета роботи – пошук оптимальних умов одержання гранул пористої аміачної селітри (далі – ПАС) з розвиненою пористою поверхневою та внутрішньою структурою як компоненти промислової вибухової речовини АСДП (міжнародна термінологія Ammonium Nitrate / Fuel Oil, ANFO) та виготовлення дослідного зразка вихрового гранулятора для одержання гранул ПАС.

Результати виконання науково-технічної роботи:

- проведено огляд методів отримання ПАС;
- проаналізовано конструкції грануляційних пристроїв для отримання гранул ПАС;
- проведено аналіз даних наукових досліджень, присвячених визначенню структури гранул ПАС;
- на базі літературного огляду попередніх наукових праць авторського колективу науково-технічної роботи визначено гідродинамічний режим руху потоків у робочому просторі вихрового гранулятора, який в подальших дослідженнях буде прийнято за базовий;
- розроблено фізичну модель руху потоків у робочому просторі вихрового гранулятора;
- розроблено методика проведення досліджень гідро- і термодинамічних умов одержання пористих поверхневого та внутрішніх шарів на гранулах ПАС та визначення фазового складу і кристалічної структури зразків гранул ПАС;
- наведено результати розрахунку гідродинамічних умов руху потоків у робочому просторі вихрового гранулятора із порівнянням отриманих даних з

даними експериментальних досліджень;

- проведено опис кінетики росту плівки на поверхні гранули вихровому грануляторі;

- досліджено фазовий склад різних зразків аміачної селітри. Показано, що всі зразки ПАС не зазнають хімічних перетворень;

- наведено результати дослідження впливу типу зволожувача, часу термообробки і кількості циклів термообробки на якість ПАС. На підставі даних вивчення морфології поверхні гранули показано, що оптимальним зволожувачем є розчин аміачної селітри з часом його сушіння до 6 хвилин і одноразовим циклом термообробки. Показником якості структури є розвинена мережа глибоких звивистих нанопор;

- реалізація запропонованого методу отримання ПАС дозволяє збільшити кількість кисню в гранулі, що позитивно впливає на ефективність ПАС;

- отримано результати досліджень показників якості гранул ПАС (міцність, поглинаюча та утримувальна здатність гранул ПАС по відношенню до рідкого палива, відносна пориста поверхня), які показують, що створені за запропонованим способом гранули переважають існуючі на даний час на ринку України аналоги.

Практична значимість отриманих результатів:

- створено алгоритм інженерного розрахунку вихрового гранулятора та запропоновано приклад розрахунку процесу отримання гранул ПАС;

- розроблено конструкторську документацію на виготовлення експериментального зразка вихрового гранулятора;

- створено комп'ютерну програму, яка дозволяє проводити розрахунок основних конструктивних розмірів вихрового гранулятора і оптимальний (визначений за даними експериментальних досліджень) режим його роботи;

- запропоновано удосконалений пристрій для отримання гранул ПАС (вихровий гранулятор), подано заявку на отримання охоронного документу на

вихровий гранулятор;

- запропоновано варіант технологічної схеми виробництва ПАС із застосуванням створеного грануляційного модуля та надано опис системи автоматизації цієї схеми.

ЗМІСТ

Вступ.....	8
1 Методи та обладнання для отримання гранул ПАС.....	9
1.1 Методи отримання гранул ПАС.....	9
1.2 Грануляційне обладнання для отримання гранул ПАС.....	14
2 Структура гранул ПАС та вплив гідродинамічного режиму роботи гранулятора на конфігурацію пор (огляд літератури).....	25
2.1 Структура гранул ПАС.....	25
2.2 Вплив гідродинамічного режиму роботи гранулятора на конфігурацію пор.....	27
3 Розроблення конструкторської документації на виготовлення дослідного зразка вихрового гранулятора.....	30
3.1 Опис конструктивного рішення, покладеного в основу науково-технічної роботи.....	30
3.2 Створення робочих креслень дослідного зразка вихрового гранулятора.....	36
4 Методика визначення фазового складу і кристалічної структури зразків гранул ПАС.....	46
5 Методика проведення досліджень гідро- і термодинамічних умов одержання пористих поверхневого та внутрішніх шарів на гранулах ПАС.....	52
5.1 Опис експериментального зразка вихрового гранулятора.....	52
5.2 Прилади та обладнання. Методи і схеми вимірювань.....	58
5.3 Статистична обробка результатів експериментальних досліджень..	60
6 Протокол досліджень гідро- і термодинамічних умов одержання пористих поверхневого та внутрішніх шарів на гранулах ПАС та визначення фазового складу і кристалічної структури зразків гранул ПАС.....	62
6.1 Фізична модель руху потоків.....	62

6.2 Аеродинаміка газового потоку.....	66
6.3 Формування структури гранули ПАС.....	86
6.4 Дослідження зразків гранул ПАС.....	94
7 Технологічна схема виробництва ПАС із використанням грануляційного модуля.....	103
7.1 Опис технологічної схеми.....	103
7.2 Методика інженерного розрахунку вихрового гранулятора.....	110
8 Комп'ютерна програма для технологічного і конструктивного розрахунку вихрового гранулятора.....	120
8.1 Керівництво користувача програми Granulation Unit.....	120
8.2 Керівництво користувача програми Vortex Granulator.....	124
8.3 Керівництво користувача програми Classification in vortex flow.....	133
9 Протокол проведення випробувань дослідного зразка вихрового гранулятора та досліджень показників якості ПАС.....	139
9.1 Компонування обладнання грануляційного модуля.....	139
9.2 Визначення гідравлічного опору та режимів роботи вихрового гранулятора.....	140
9.3 Методика визначення показників якості ПАС.....	145
9.4 Показники якості ПАС.....	150
Висновки.....	152
Перелік джерел посилання.....	155
Додатки	

ВСТУП

Необхідним компонентом найпростіших промислових вибухових речовин (ПВР) є аміачна селітра, яка виготовлена для потреб аграрної промисловості (звичайна або рядова аміачна селітра). У суміші з дизельним паливом вона є досить ефективною і порівняно дешевою ПВР, яке знайшло широке застосування при проведенні вибухових робіт на відкритих і підземних розробках. Основним недоліком такої ПВР, що призводить до зниження його ефективності аж до повної відсутності детонації, є швидке стікання дизельного палива з поверхні аміачної селітри.

В останні роки актуальними стають проблеми забезпечення екологічної безпеки виробництва ПВР і проведення вибухових робіт. Задоволення сучасним екологічним, технологічним і економічним вимогам до ПВР, що виготовляється на основі рядовий аміачної селітри, є достатньо складним. Крім того, звичайна рядова селітра в подальшому буде вапнуватись для зниження вмісту азоту і зменшення вибухових властивостей згідно з директивою Ради Європи.

Аміачна селітра є одним з найдешевших компонентів промислових вибухових речовин. Як індивідуальний компонент аміачна селітра не здатна вибухати: для її активації потрібна додаткова енергія. Слід також виконати наступні умови:

- наявність в гранулі розвиненої мережі нанопор різної конфігурації і глибини;
- наявність рідкої вуглеводневої горючої речовини, наприклад, дистилату дизельного палива;
- наявність в ядрі гранули кисню.

У світовій практиці сипкі ПВР виготовляються, в основному, із застосуванням спеціальної пористої аміачної селітри. Сипкі ПВР широко впроваджуються у вибухові роботи замість більш небезпечних і дорогих тротилвмісних. ПАС забезпечує більш повне протікання хімічних реакцій в процесі вибуху завдяки більшій (в порівнянні з рядовою аміачною селітрою) поверхні контакту з дизельним паливом. ПАС також є основою емульсійних ПВР.

В даний час процес впровадження ПАС при виробництві вибухових робіт лімітується відсутністю на Україні власного її виробництва.

1 МЕТОДИ ТА ОБЛАДНАННЯ ДЛЯ ОТРИМАННЯ ГРАНУЛ ПАС

Матеріали розділу наведено на основі даних [1,2]

1.1 Методи отримання гранул ПАС

Застосування гранул аміачної селітри в якості компонента промислових вибухових речовин є одним з найбільш економічно вигідних варіантів. Для приготування суміші аміачної селітри з дистиллятом дизельного палива (ANFO) може бути використана як звичайна аміачна селітра (мінеральне добриво), так і аміачна селітра з підвищеною пористістю (далі – ПАС).

В даний час ведеться удосконалення існуючих способів отримання пористої аміачної селітри і розробка нових.

Технологічні основи одержання ПАС повинні враховувати наступні аспекти:

- оцінка можливості отримання ПАС без застосування пороутворюючих і модифікаційних добавок;
- забезпечення міцності ядра гранули при наявності розвиненої пористої структури її поверхні і приповерхневих шарів;
- створення мережі пор необхідного розміру і конфігурації для безперешкодного проникнення дистилляту дизельного палива в гранулу і його надійного утримання в гранулі;
- можливість використання в якості вихідної сировини не розплаву аміачної селітри, а гранул рядової аміачної селітри.

Всі ці аспекти застосовні для дрібнотонажних і середньотонажних виробництв, перевагою яких може бути мобільність установки і можливість її роботи безпосередньо на місці проведення вибухових робіт. Для великотоннажних виробництв надійним способом є отримання ПАС в грануляційних вежах.

Рядова аміачна селітра може бути підготовлена для застосування в якості компонента промислової вибухової речовини з використанням, наприклад, таких операцій:

- дроблення гранул;
- видалення оболонки (пудра з різних інертних речовин), яка знижує злежуваність гранули.

Всі ці операції спрямовані на підвищення обсягу пористості і тріщин після механічного руйнування вихідних гранул. В такому випадку, не дивлячись на високі показники поглинальної здатності, значення утримувальної здатності не відповідає мінімальному нормативному показнику. Тому ANFO на основі рядової аміачної селітри має готуватися безпосередньо на місці проведення вибухових робіт і зберігатися короткий час (внаслідок інтенсивного стікання дистилату дизельного палива).

Значно успішніше в технології отримання ANFO застосовується ПАС. Гранули з розвиненою пористою структурою дозволяють надійно утримувати дистилат дизельного палива при транспортуванні до місця проведення вибухових робіт і зберіганні промислової вибухової речовини.

Перед дослідниками ставиться завдання розробки нових способів отримання ПАС з розвиненою пористою структурою, які забезпечать необхідні нормативні показники гранул для успішного їх використання в якості компонентів ANFO.

ПАС може бути отримана безпосередньо при формуванні гранули (виготовленні продукту) або при фізичному і термічному впливі на вже сформовані гранули аміачної селітри з метою зміни її структури і утворення так званих «механічних» пор. Перша група способів вимагає застосування різного роду добавок для інтенсифікації процесу пороутворення. Фактор необхідності введення цих добавок є причиною підвищення вартості готової продукції. Друга група способів дозволяє отримати розвинену пористу структуру без застосування

пороутворюючих добавок. Коротка характеристика підспособів отримання ПАС в рамках представленої класифікації представлена в таблиці 1.

Таблиця 1. Способи отримання ПАС

№ з/п	Спосіб отримання гранул	Структура гранул
1	Приллювання «сухого» плаву і охолодження гранул в монотонному режимі	Тіла кулястої форми з гладкою поверхнею і усадковою раковиною в щільному кристалічному масиві
2	Приллювання «сухого» плаву, спінювання крапель пороформом і охолодження в монотонному режимі	Тіла кулястої форми з гладкою поверхнею і газовими включеннями замкнутого характеру в щільному кристалічному масиві
3	Приллювання «вологого» плаву і охолодження з сушінням в ступінчастому режимі	Тіла округлої форми з горбистою поверхнею і проявом порожнини в пухкому кристалічному масиві
4	Формування гранул шляхом наплення плаву на затравку (грануляція)	Тіла округлої форми з горбистою поверхнею і однорідної зернистою структурою в масиві
5	Формування гранул з добавками солей заліза, з подальшою обробкою поверхнево-активними речовинами в барабані	Тіла округлої форми з проявом утворень у вигляді лусочок на поверхні і зернистим будовою тіла
6	Термічна обробка - «поризація» готових гранул по п.п. 1,2,5 із здійсненням фазових переходів	Відповідає вихідній аміачній селітрі, але насичується тріщинами по поверхні і в тілі гранули
7	Зволоження з наступною термічною обробкою (сушінням) із здійсненням фазових переходів	Ядро гранули відповідає вихідній аміачній селітрі, поверхня і приповерхневих шари гранули - комбінація пор різних розмірів, глибини і конфігурації

Огляд та аналіз патентної документації дозволив запропонувати спосіб отримання гранул ПАС в вихрових грануляторах методом зволоження з наступною термообробкою.

Удосконалена схема отримання ПАС (спосіб 7 в таблиці 1) дозволяє отримати пори в заданому діапазоні розмірів, що позитивно позначається на показнику утримуючої здатності гранули. Однак при цьому способі можливе руйнування гранули рядової аміачної селітри внаслідок високого значення кінцевої вологості.

Гранули ПАС з надлишковою кінцевою вологістю характеризуються такими властивостями:

- недостатньо розвинена пориста структура;
- велика кількість «механічних» пор, які мають прямолінійну конфігурацію;
- неміцне ядро гранули (як наслідок наявності в гранулі значної кількості «механічних» пор);
- переважна наявність прямолінійних макропор в пористій структурі гранули, що пояснюється високою інтенсивністю видалення вологи в період зростання швидкості сушіння (прогрів матеріалу і перший період сушіння відповідно до прийнятної термінології).

Тут слід звернутися до інформації про модифікаціях аміачної селітри (таблиця 2). Аміачна селітра в твердому стані в інтервалі температур від -17 до $169,6$ °C має п'ять кристалічних модифікацій, кожна з яких має строго певний діапазон температур.

Поліморфні перетворення аміачної селітри в залежності від умов отримання і зберігання можуть мати негативний вплив на її фізико-механічні властивості. Перехід з однієї модифікації в іншу (поліморфний перехід) супроводжується зміною кристалічної структури і обсягу кристалічної решітки. Процеси переходу однієї модифікації аміачної селітри в іншу є оборотними. Переходи з однієї модифікації в іншу оборотні і протікають з розпушуванням структури, що зі

збільшенням кількості переходів негативно позначається на міцності гранули. Збереження вихідної сипучості гранул селітри в умовах тривалого зберігання істотно залежить від частоти перетворення III \leftrightarrow IV, що протікає при 32,3 ° C зі зменшенням питомої обсягу на 3,7%. Найміцніші гранули будуть виходити в разі протікання модифікаційних перетворень аміачної селітри з мінімальними об'ємними і структурними змінами, тобто без суттєвої деформації її кристалів. Ця умова буде дотримуватися при заміні послідовно протікає ланцюжка перетворень II \rightarrow III \rightarrow IV на перетворення II \rightarrow IV. Стабілізація перетворення II \rightarrow IV відбувається при зменшенні залишкового вмісту вологи в ПАС після її отримання.

Таблиця 2. Модифікації аміачної селітри

Модифікація	Діапазон зміни температури для різних модифікацій, °C	Вид симетрії	Зміна в об'ємі, %
I	169,6-125,2	Кубічна	-2,13
II	125,2-84,2	Тетрагональна	-1,33
III	84,2-32,3	Ромбічна моноклінальна	+0.8
IV	32,3-(-17)	Ромбічна бипірамідальна	-3,3
V	(-17)-(-50)	Тетрагональна	+1,65

Рівноважні температури модифікаційних перетворень аміачної селітри можна змінити за рахунок збільшення кількості вологи в гранулі, що вплине на кінетику поліморфних переходів. В міру збільшення вмісту води від 0,5 до 3,4% температура переходу IV \rightarrow III знижується від 48 до 37 ° C, з підвищенням вмісту води від 0,03 до 0,5% температура переходу I \rightarrow III знижується зі 125 до 120 °C. Цей факт є ще одним обґрунтуванням необхідності здійснювати не тільки термообробку гранули, а й її попереднє зволоження. Однак волога не змінює природу модифікаційних переходів.

Кінцеве значення поглинальної здатності також може бути підвищено за рахунок більш інтенсивної сушки в період падаючої швидкості. Здійснити цей процес при тривалій сушці в вихровому потоці сушильного агента можливо лише за умови вдосконалення гідродинамічних умов руху потоків.

1.2 Грануляційне обладнання для отримання гранул ПАС

До основного обладнання вузла грануляції відносяться грануляційні вежі і гранулятори зваженого шару (зокрема, вихрового типу).

Застосовуються грануляційні вежі різної конструкції, виконані з різних матеріалів (рис. 1). Найбільше поширення донедавна мали залізобетонні вежі циліндричної форми діаметром 16 і 12 м, висотою 30- 35 м. У їхній нижній частині співвісно розташований охолоджувач киплячого шару, що може займати тільки частину поперечного перерізу або весь переріз вежі.

У нових агрегатах виробництва аміачної селітри вежа зібрана з листової кислотостійкої сталі і має прямокутний перетин 11×8 м і висоту 50 м. Використання веж різної висоти обумовлено застосуванням вбудованих чи виносних охолоджувачів киплячого шару, а також заданим гранулометричним складом продукту. Чим більші повинні бути гранули продукту, тим більша висота необхідна для забезпечення достатньої повноти кристалізації і формування гранул. У нижній частині вежі розташовані зручні для чищення гумові конуси, а охолоджувач киплячого шару зроблений виносним. Прийнята при цьому висота 50 м (за інших рівних умов) дозволяє одержати більш великий гранулометричний склад продукту із середнім діаметром гранул 2,5-2,6 мм і підвищеним змістом фракції 2-3 мм. Прямокутна форма вежі обрана з будівельних міркувань і зручна для використання (у якості одного з варіантів) лінійних віброгрануляторів у виді труб з перфорованою поверхнею. Застосування

металевої вежі дозволяє значно скоротити час на її спорудження в порівнянні з вежею з залізобетону.

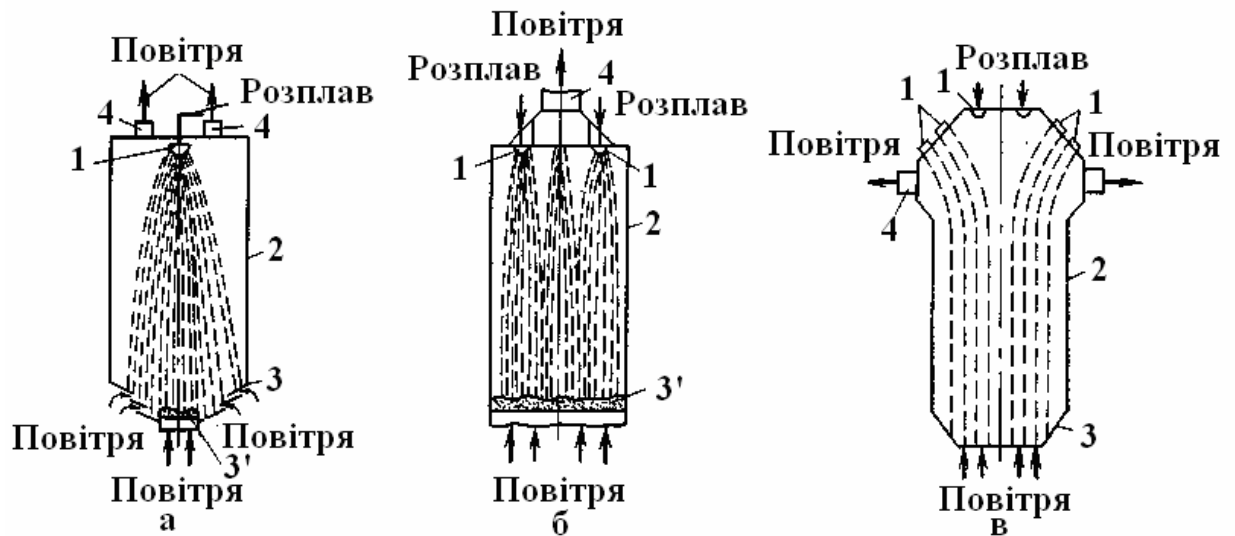


Рис.1. Схеми грануляційних веж різних типів:

а - залізобетонна циліндрична вежа діаметром 16 м і висотою 30-35 м з конусами й охолоджувачем киплячого шару; б - залізобетонна циліндрична вежа діаметром 12 м і висотою 30 м з охолоджувачем киплячого шару по всьому поперечному перерізу; в - металева прямокутна вежа з перерізом 11×8 м з конусом у нижній частини.

Подібно тому, як можуть бути розходження у введенні і виведенні важкої фази (встановлений один гранулятор або декілька; застосовується чи не застосовується охолодження в киплячому шарі, чи весь перетин вежі він займає, можливі розходження у введенні і виведенні газової фази. Введення повітря залежить від того, чи мається киплячий шар і яка його величина. Виведення повітря може здійснюватися вище рівня розташування грануляторів і нижче його, по осі вежі чи з її периферії. У кожному з перерахованих варіантів варто забезпечувати мінімальний вплив потоку, що виводить, на гідродинаміку струменів, що розпадаються, і траєкторії руху гранул.

Основні недоліки грануляційних веж:

- навантаження по розплаву в поперечному перерізі вежі розподіляється нерівномірно;
- необхідність великої кількості повітря для охолодження гранул;
- значні капіталовкладення при будівництві та експлуатації;
- великі габарити.

Одним з найбільш ефективних методів здійснення процесів тепломасообміну є використання зваженого шару при контакті фаз. Така система характеризується низкою переваг, зазначених у роботах зарубіжних і вітчизняних вчених: рівномірний нагрів продукту, який дозволяє застосовувати високі температури сушильного агента; інтенсивний рух, близьке до ідеального перемішування частинок, максимальна поверхню контакту фаз, малий гідравлічний опір шару продукту; простота конструкції і зручність експлуатації і т.д.

Поряд з перевагами слід також виділити недоліки апаратів зваженого шару:

1. Нерівномірність часу перебування у зваженому шарі зернистого матеріалу (однаково можливі швидке проскакування частинок і їх перебування в шарі довше середньостатистично визначений час).
2. Неможливість управління рухом зернистого матеріалу при необхідності забезпечення короткочасного або пролонгованого контакту зі зріджуючим агентом.
3. Можлива небажана зміна властивостей зернистого матеріалу (стирання, розтріскування, злипання та ін.).
4. Обов'язкова присутність в складі технологічної схеми потужних пилоуловлюючих апаратів на виході газів з зваженого шару, особливо при широкому фракційному складі твердої фази.
5. Ерозія апаратури в зоні зваженого шару, особливо значна при використанні зернистого матеріалу з високими абразивними властивостями.
6. Підвищені енергетичні витрати, пов'язані з нагнітанням зріджуючого агента і недостатньою утилізацією тепла.

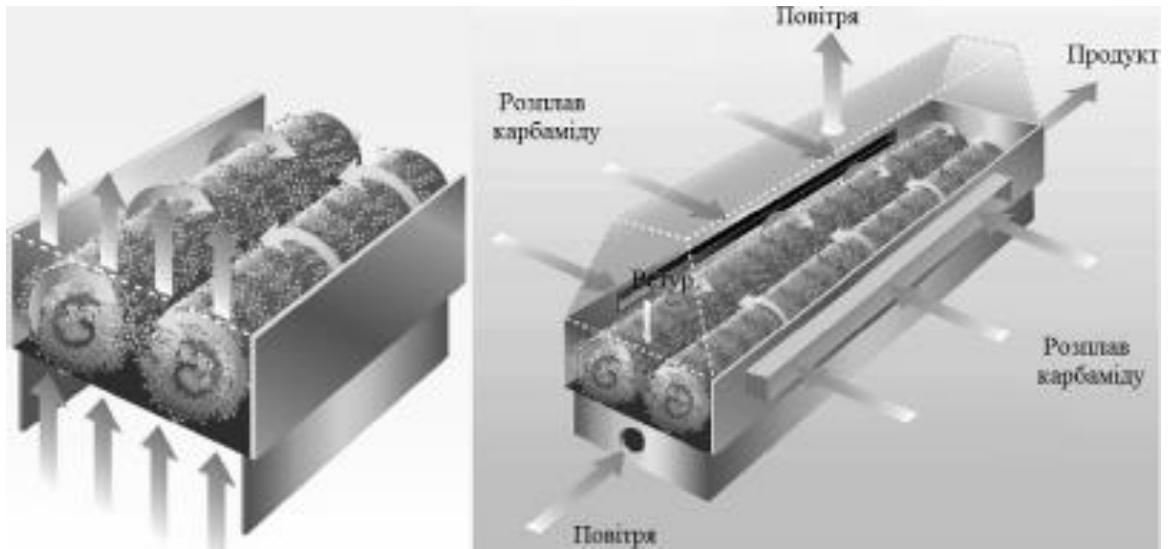
7 . Низька стабільність зваженого шару в широкому діапазоні зміни навантажень по суцільній і дисперсній фазам.

На даний час в технології одержання гранульованої продукції також знайшли використання гранулятори зваженого шару вітчизняних та зарубіжних (Urea Casale S.A., Kahl Group, Neuhaus Neotec, Changzhou Xianfeng Drying Equipment Company Ltd та ін.) виробників [3-10].

В даний час у світі є одиничні приклади успішного застосування вихрових грануляторів у промисловості, зокрема, світовим лідером виробництва вихрового грануляційного обладнання є корпорація Urea Casale. Для гранулювання карбаміду у зваженому шарі корпорацією застосовано вихровий апарат з одним або двома горизонтальними обертовими вихорами [11] (рис. 2).

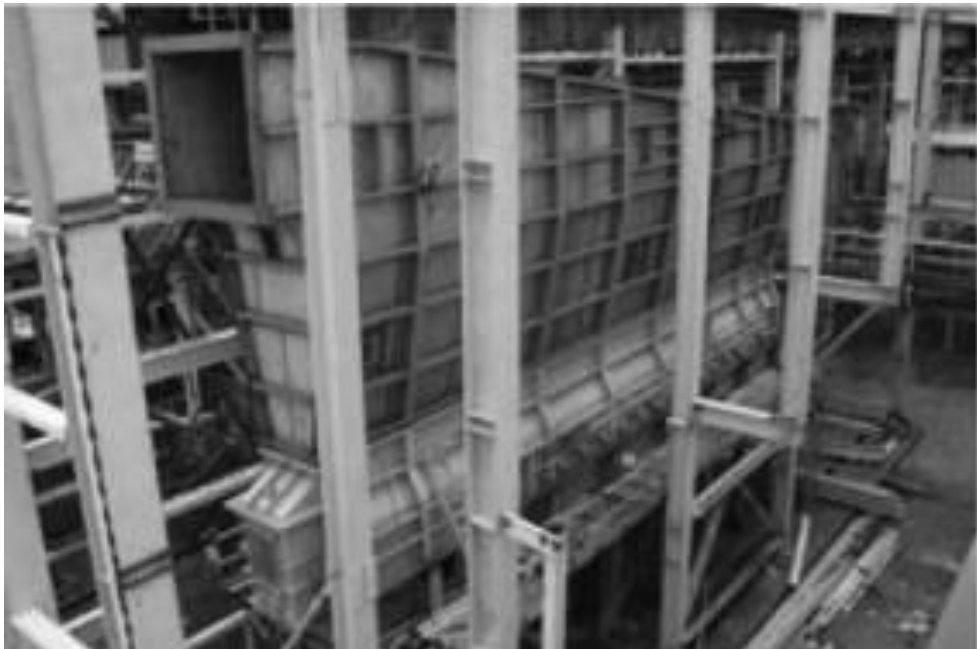
Описана нижче конструкція придатна для якісного нанесення покриття на органічну речовину (наприклад, насіння), для процесів гранулювання їй властивий ряд недоліків – наприклад, відсутність процесу класифікації гранул, нерівномірність нанесення плівки розплаву. Крім того, установка гранулятора супроводжується установкою обладнання для подрібнення та розсіювання або він застосовується після грануляційної вежі для дорошування гранул, що призводить до додаткових енергетичних витрат.

Серед промислових зразків вихрових грануляторів зваженого шару слід виділити апарати BATCH-FB (гранулятори періодичної дії) та CONTI FB (апарати безперервної дії) корпорації Neuhaus Neotec, технологія Heinen Drying® [12] (рис. 3).



а

б



в

Рис. 2. Vortex[®] granulator: а – принцип дії; б – рух потоків; в – промислова установка



а

б

Рис. 3. Вихрові гранулятори Neuhaus Neotec: а - BATCH-FB; б - CONTI FB

Недоліком таких апаратів є їх періодичність (для апаратів BATCH-FB) та наявність обертових частин і системи Вурстера при подачі рідини у зважений шар. Такі апарати за принципом дії близькі до апаратів з фонтануючим зваженим шаром без направленої руху зріджуючого агента. В них не проводиться процес класифікації гранул, неможлива внутрішня циркуляція ретурна для дорощування його до товарної фракції.

В рекламних проспектах ряду вихрових грануляторів зваженого шару (рис. 4), які виробляються індійськими [13] та китайськими [14-17] підприємствами зазначено, що вони «характеризуються наявністю спеціалізованого розподільника повітря, який забезпечує безперервний рух матеріалу, і вирішує проблеми можливого виникнення каналного потоку і «мертвого» кута». Інші дані стосовно механізмів створення вихрового руху газового потоку та особливостей гранулювання виробники не надають, але порівняльна характеристика конструкції індійських та китайських апаратів з апаратом CONTI FB від Neuhaus Neotec дозволяє встановити велику ймовірність простого копіювання. Недоліки вказаних апаратів аналогічні недолікам CONTI FB.

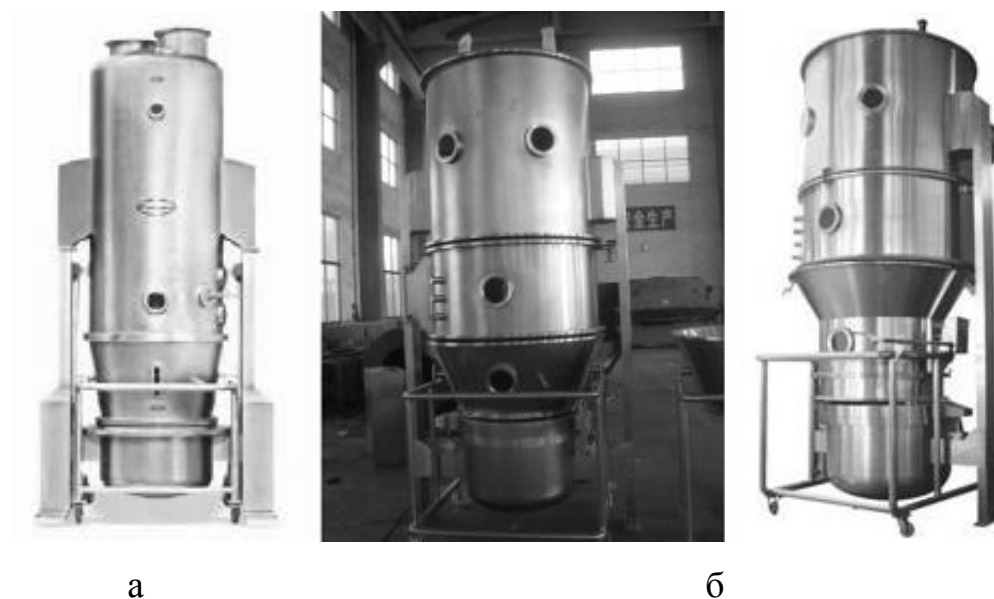


Рис. 4. Індійський (а) та китайські (б) аналоги апарату CONTI FB (Neuhaus Neotec)

Ще один різновид апаратів для гранулювання у вихровому потоці - гранулятор фірми Changzhou Xiandao Drying Equipment [18], оснований на схемі Вурстера з центральною закруткою газového потоку при введенні розчину на гранулювання (рис. 5).

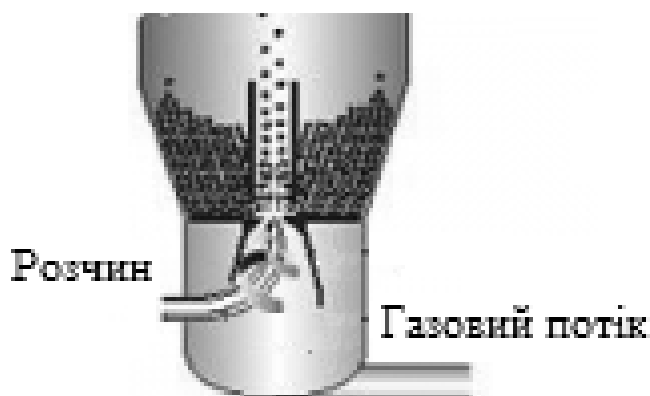


Рис. 5. Гранулятор зі схемою Вурстера та центральною закруткою газového потоку

На відміну від широкорозповсюдженої технології верхнього розпилення в цьому апараті здійснюється прямоточний рух газového потоку і гранул за рахунок нижнього розпилення рідкого матеріалу. На початковому етапі формування

гранули здійснюють впорядкований рух і утворюють стабільний вихор в центральній трубці.

Вихровий рух потоків усуває проблеми можливого виникнення застійних зон. В той же час, апарат придатний для виробництва дрібних гранул, адже зі збільшенням розміру гранули підвищується вірогідність утворення агломератів та деформації краплі у вихровому потоці.



Рис. 6. Гранулятор FlexStream™

Окремо слід виділити апарати FlexStream™ [19], які поєднують тангенційне введення розчину та застосування вихрового газового потоку (рис. 6). В таких апаратах забезпечується однорідний ріст гранул з низькою крихкістю. В той же час, в таких апаратах має місце перезволоження зваженого шару під час здійснення гранулювання.

Серед інших зразків вихрових грануляторів, які не одержали широкого промислового впровадження, слід виділити апарат з ротаційним зваженим шаром на обертовому диску багатосекційний апарат коробчастого типу з просічним газорозподільним пристроєм, апарат з пластинчастим газорозподільним пристроєм [20].

Окремі конструкції грануляторів вихрового типу розроблено на теренах країн СНД. Серед них - апарат з вихровим шаром гранул (рис. 7), сушарка-

гранулятор вихрового типу із зустрічними струменями (рис. 8), гранулятор із сепарацією частинок у вихровому шарі (рис. 9). В цих грануляторах в якості допоміжних процесів відбувається груба класифікація та сепарація.

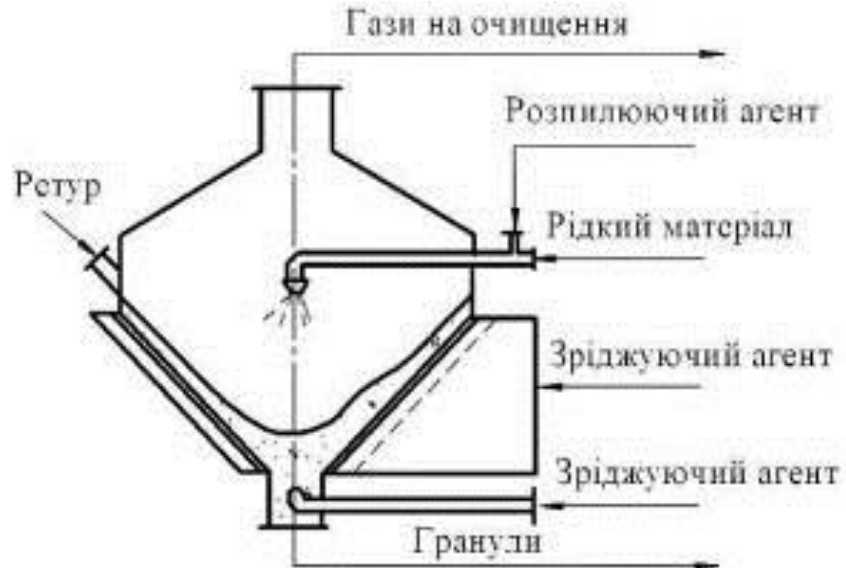


Рис.7. Апарат з вихровим шаром гранул

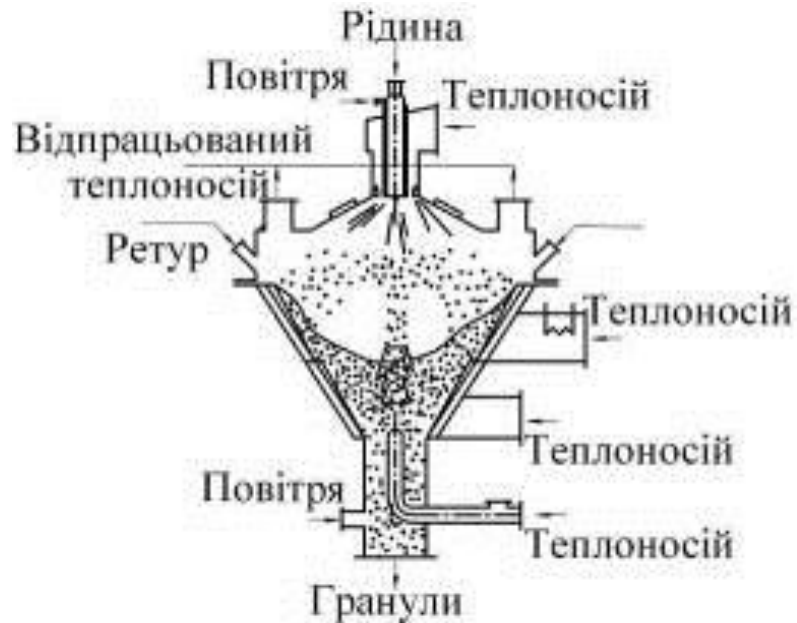


Рис.8. Сушарка-гранулятор вихрового типу із зустрічними струменями

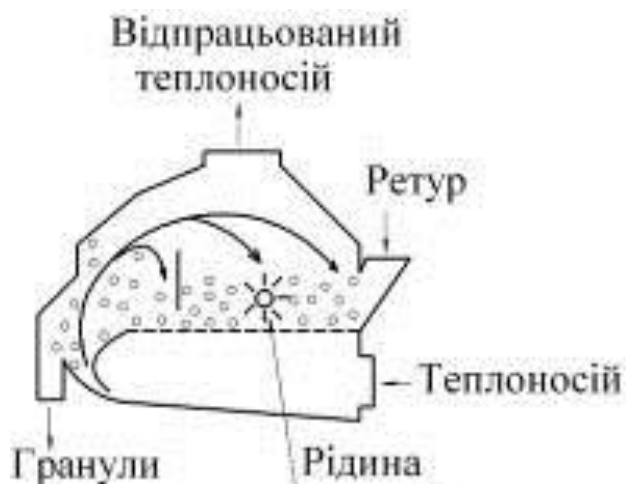


Рис.9. Гранулятор із сепарацією частинок у вихровому шарі

Вихрові гранулятори зі змінною за висотою площею поперечного перерізу, в яких, окрім власне гранулювання, організовані процеси класифікації гранул за розмірами, сепарації дрібних гранул та використання їх в якості внутрішнього ретуру, розроблені науковцями Сумського державного університету (рис. 10). Результати дослідно-промислового впровадження грануляторів такої конструкції [21] довели їх ефективність та перспективність та дозволяють стверджувати про можливість їх виходу на ринок за умови створення ґрунтового теоретичного опису процесу та надійної методики інженерного розрахунку.

В апаратах такого типу обертовий потік теплоносія забезпечує впорядкований рух матеріалу. Завдяки зваженому круговому руху матеріал не утворює агломератів.

Поряд з перевагами, які характеризують представлені конструкції вихрових апаратів (зменшені габарити, створення в робочому об'ємі інтенсивної гідродинаміки) існують окремі недоліки, які негативно впливають на якість гранульованого продукту:

- неможливість управління часом перебування дисперсної фази в об'ємі пристрою;
- створення застійних зон в нижній частині апарату;
- зменшення ступеню монодисперсності гранульованого продукту внаслідок відсутності процесу класифікації.

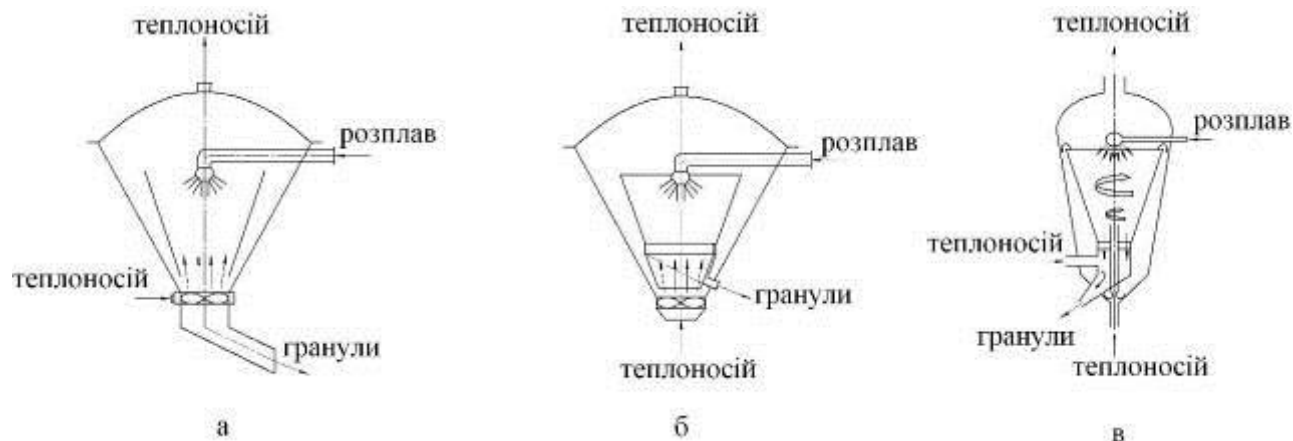


Рис.10. Вихрові гранулятори зі змінною за висотою площею поперечного перерізу: а – з внутрішнім конусом та нижнім відведенням гранул; б – з внутрішнім конусом та боковим відведенням гранул; в – з внутрішньою циркуляцією ретура

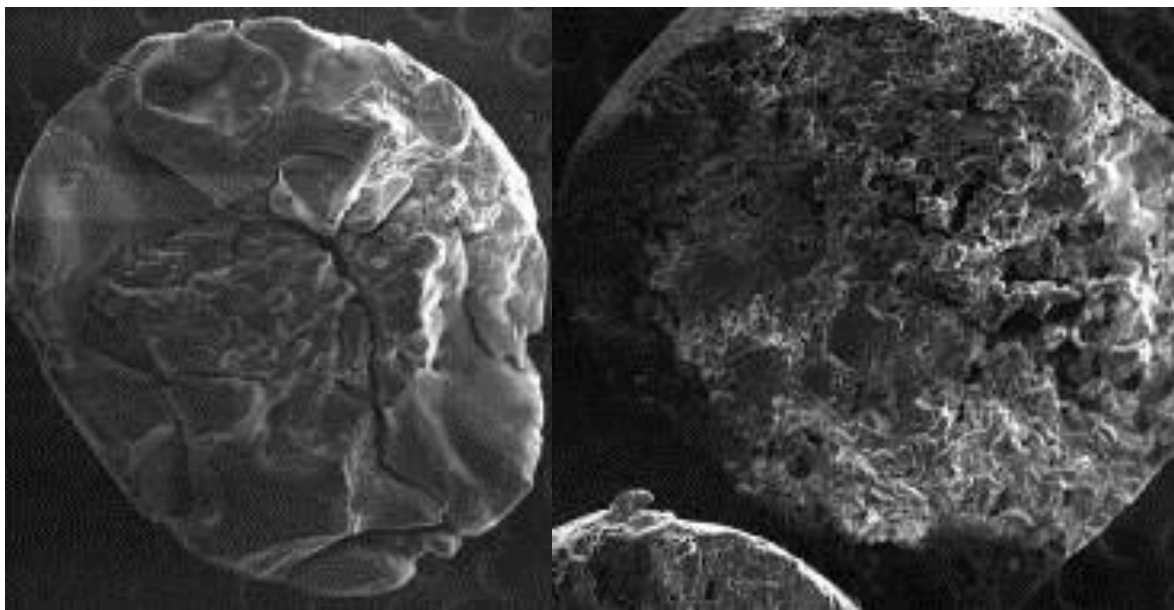
Ці недоліки усуваються при застосуванні універсальних вихрових грануляторів, які можуть поєднувати в своєму робочому об'ємі процеси гранулювання, класифікації, висушування та охолодження. Апарати такого типу завдяки швидкій переналадці можуть застосовуватись при виробництві гранульованих продуктів в хімічній, харчовій, фармацевтичній гірничодобувній та інших галузях промисловості.

2 СТРУКТУРА ГРАНУЛ ПАС ТА ВПЛИВ ГІДРОДИНАМІЧНОГО РЕЖИМУ РОБОТИ ГРАНУЛЯТОРА НА КОНФІГУРАЦІЮ ПОР

Матеріали розділу наведено на основі даних [22-24]

2.1 Структура гранул ПАС

Гранули аміачної селітри до зволоження і термообробки (рис. 11 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. 11 б) мають в своєму обсязі різні види пор, які утворилися в результаті випаровування і виходу аміаку вологи з гранули.



а

б

Рис. 11. Структура вихідної гранули аміачної селітри (а) і гранули пористої аміачної селітри після зволоження і термообробки (б)

Експериментальні дослідження дозволили виділити в структурі гранули аміачної селітри такі види пор:

- тріщини (12 а);
- відколи (12 б);

- каверни (12 в);
- канали (12 г).

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

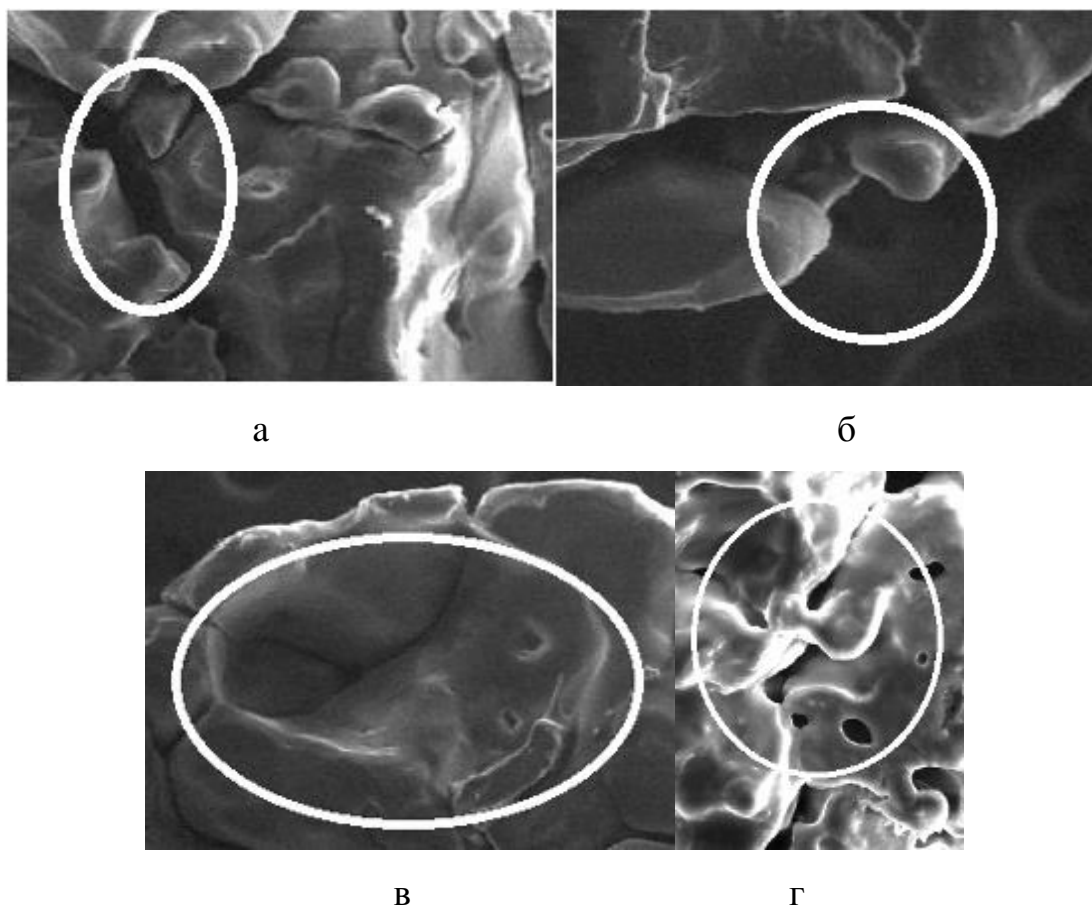


Рис. 12. Види пор в структурі аміачної селітри: тріщини (а), відколи (б), каверни (в), канали (г)

Канали різної форми характерні лише для гранул ПАС. Форма цих каналів може бути як прямолінійною, так і криволінійною (звивистою). Прямая 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 необхідна кількість дизельного палива, в закритих каналах - кисень, необхідний для детонації вибухової речовини.

2.2 Вплив гідродинамічного режиму роботи гранулятора на конфігурацію пор

Представлені нижче рис. 13-17 демонструють зміну пористої структури гранули ПАС в міру збільшення інтенсивності руху псевдозрідженого шару. Зображення основних режимів роботи вихрового гранулятора дозволяють судити про інтенсивність взаємного переміщення гранул в різних зонах. Характеристику інтенсивності можна описати швидкістю газового потоку, який відповідає кожному гідродинамічному режиму. Ця швидкість залежить від діаметра (маси) гранули і ступеня стисненості потоку.

Зі збільшенням інтенсивності руху псевдозрідженого шару спостерігаються такі закономірності:

- за рахунок інтенсифікації тепломасообмінних процесів і активізації процесу видалення вологи з утворенням нових мезопор їх кількість зростає. Цей показник впливає на поглинаючу здатність гранули;
- в збільшенні інтенсивності руху в структурі гранули з'являються криволінійні мікропори. Наявність криволінійних мікропор впливає на показник

утримуючої здатності гранули;

- поступово зростає площа пористої поверхні, що особливо помітно для трьох останніх режимів;

- зростає глибина «створення» криволінійних мікропор. При цьому підбирається такий режим, при якому в гранулі залишається цілісне ядро без «модифікаційних» пор (можлива наявність «механічних» пор внаслідок температурних напружень всередині гранули і дефектів вихідної гранули);

- за рахунок збільшення інтенсивності руху і зіткнення гранули починають втрачати свою міцність (при цьому в рамках цієї роботи забезпечений нормативний показник міцності).

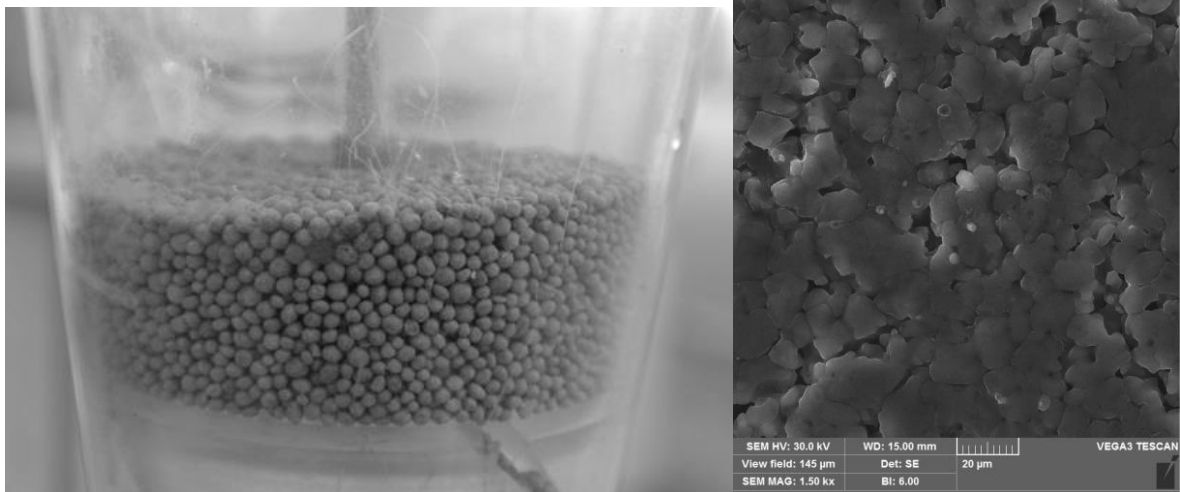


Рис. 13. Фільтрування газового потоку крізь стаціонарний шар

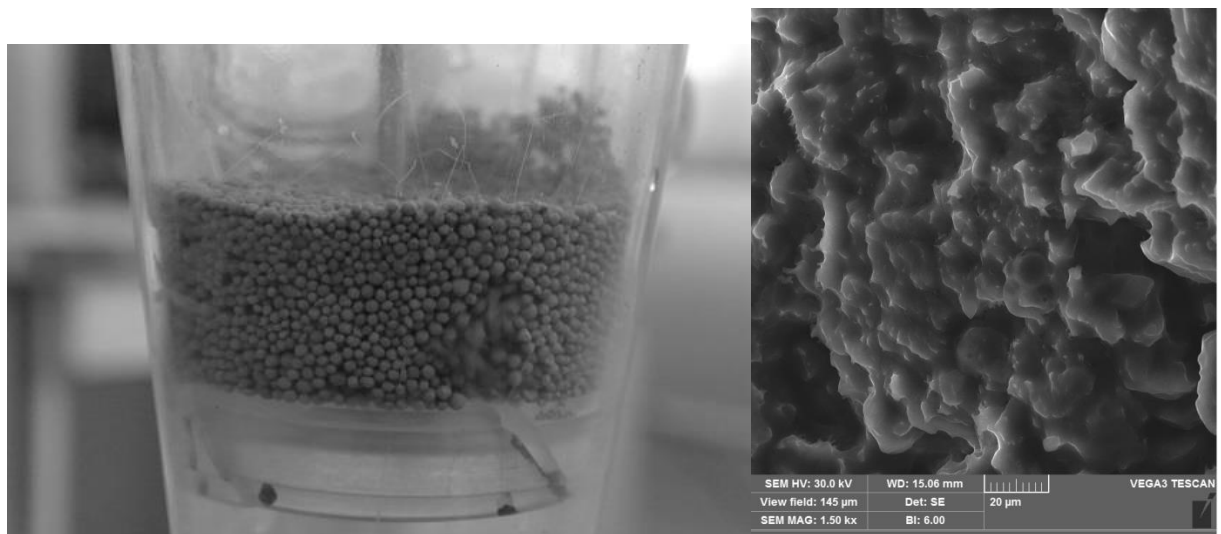


Рис. 14. Початок переміщення шару



Рис. 15. Частково зважений шар

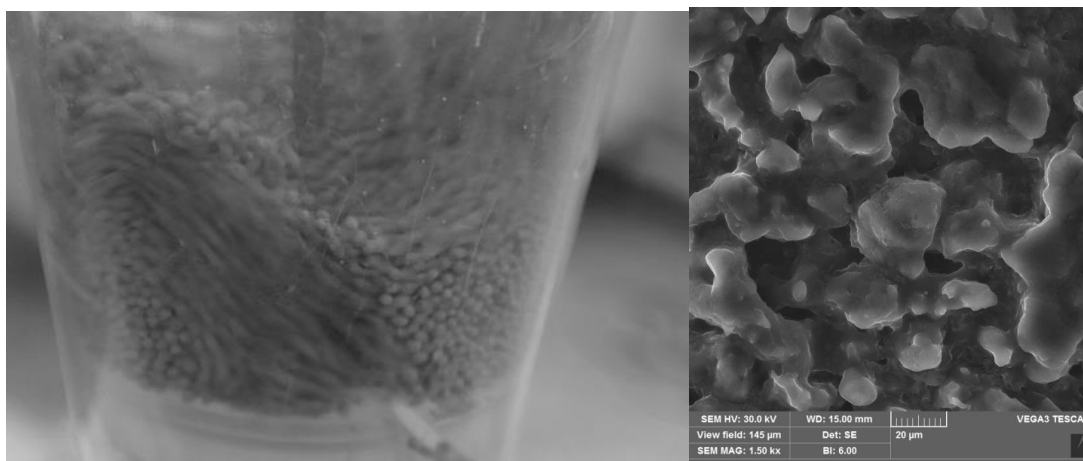


Рис. 16. Розвинений зважений шар з частковим його закручуванням

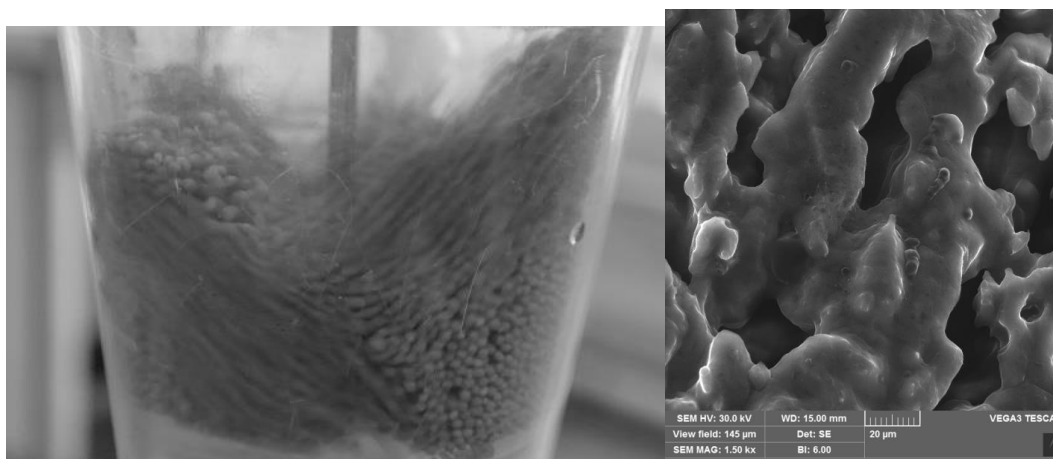


Рис. 17. Розвинений вихровий зважений шар

На основі проведених досліджень в якості оптимального обраний діапазон стійкої роботи гранулятора між псевдозрідженим шаром з частковою закруткою і розвиненим вихровим псевдозрідженим шаром.

3 РОЗРОБЛЕННЯ КОНСТРУКТОРСЬКОЇ ДОКУМЕНТАЦІЇ НА ВИГОТОВЛЕННЯ ДОСЛІДНОГО ЗРАЗКА ВИХРОВОГО ГРАНУЛЯТОРА

3.1 Опис конструктивного рішення, покладеного в основу науково-технічної роботи

В якості прототипу вихрового гранулятора, розробка робочої конструкторської документації на виготовлення якого є завданням етапу, розглянуто конструкцію, наведену в [25]. На основі описаного прототипу реалізовано вдосконалення окремих вузлів дослідного зразка вихрового гранулятора.

Відомий пристрій, що містить вертикальний конічний корпус, розпилювач рідкого матеріалу, кришку, патрубки підводу теплоносія та відводу готового продукту у нижній частині вертикального конічного корпусу, патрубки підводу плаву і відводу теплоносія у верхній частині корпусу а також завихрювач потоку теплоносія (авторське свідоцтво СРСР №1554958, МПК В01J2/16, 1990).

Недоліком цього пристрою є те, що після проходження теплоносієм патрубку підводу він не встигає рівномірно розподілитись під завихрювачем, внаслідок чого теплоносій проходить не весь поперечний переріз завихрювача і не всі розгінні елементи завихрювача приймають участь у формуванні вихрового руху теплоносія. Це стає причиною нерівномірного спіралеподібного руху гранул, що спричиняє нерівномірне нанесення на ретур плівки розчину або розплаву.

Найбільш близьким до розробленого пристрою для гранулювання рідкого матеріалу є пристрій, що містить основний вертикальний корпус з кришкою і днищем, всередині якого концентрично встановлений додатковий конус, з утворенням між їхніми бічними поверхнями міжкорпусної кільцевої порожнини, вертикальний патрубок, верхній кінець якого розташований у робочому об'ємі додаткового конуса, а нижній кінець у днищі основного вертикального корпусу, патрубки для подачі і відводу теплоносія, патрубок для подачі рідкого матеріалу з розпилювачем, який розташований на одній осі з додатковим конусом, патрубок

для подачі газового потоку, розміщений у днищі основного корпусу свіввісно з вертикальним патрубком, кільцевий уловлювач гранул з днищем, вихровий газорозподільний вузол та розподільний елемент у вигляді провальної перфорованої решітки, розташовані на одній осі з додатковим конусом (патент України №82754 7МПК В 01 J 2/16, 2008).

Недоліками пристрою є те, що в зоні введення теплоносія відбувається одночасне відведення гранул, причому це відведення носить нерівномірний характер, що перешкоджає рівномірному розподілу теплоносія до моменту надходження у вихровий газорозподільний вузол. Відсутність перерозподілювача теплоносія, який одночасно є перерозподілювачем гранул, що відводяться, призводить до того, що потік теплоносія не проходить крізь весь вихровий газорозподільний вузол, особливо його периферійну частину. Наслідком цього є виникнення застійних зон в нижній частині робочого простору (переважно на периферії) та відсутність інтенсивного бокового перемішування в цій же частині пристрою. Наявність застійних зон та відсутність бокового перемішування призводить до виникнення температурних неоднорідностей у зваженому шарі, що знижує рівномірність утворення твердої плівки з розчину або розплаву на поверхні гранули, погіршує показники міцності готового продукту та ступінь його монодисперсності.

В основу корисної моделі поставлене завдання удосконалення вихрового гранулятора зваженого шару шляхом зміни його конструкції, а саме обладнання його додатковим елементом для рівномірного перерозподілу теплоносія перед проходженням вихрового газорозподільного вузла, а також перерозподілу гранул, що відводяться з пристрою.

Таке конструктивне рішення інтенсифікує процес гранулоутворення, а також збільшує ступінь монодисперсності гранул, підвищуючи якість цільового продукту.

Поставлене завдання вирішується тим, що у відомому вихровому грануляторі зваженого шару, що містить вертикальний корпус з кришкою і днищем, всередині якого концентрично встановлений додатковий конус, з утворенням між їхніми бічними поверхнями міжкорпусної кільцевої порожнини, вертикальний патрубок, верхній кінець якого розташований у робочому об'ємі додаткового конуса, а нижній кінець у днищі основного вертикального корпусу, патрубки для подачі і відводу теплоносія, патрубок для подачі рідкого матеріалу з розпилювачем, який розташований на одній осі з додатковим конусом, патрубок для подачі газового потоку, розміщений у днищі основного корпусу світвісно з вертикальним патрубком, кільцевий уловлювач гранул з днищем, вихровий газорозподільний вузол та розподільний елемент у вигляді провальної перфорованої решітки, розташовані на одній осі з додатковим конусом, згідно корисної моделі, розподільний елемент у вигляді провальної перфорованої решітки розміщений в середній частині кільцевого уловлювача гранул.

При встановленні розподільного елемента у вигляді провальної перфорованої решітки в середній частині кільцевого уловлювача гранул стає можливим провести перерозподілення теплоносія по всьому перерізу кільцевого уловлювача гранул до моменту надходження до вихрового газорозподільного вузла. У такому випадку теплоносій надходить до вихрового газорозподільного вузла по всьому його перерізу, що знижує вірогідність виникнення застійних зон в нижній частині робочого простору та значно інтенсифікує бокове перемішування гранул. Зменшення застійних зон та інтенсифікація бокового перемішування гранул призводить до вирівнювання температурних полів матеріалу у зваженому шарі, що дозволяє проводити процес нанесення плівки розчину або розплаву та грануло утворення при однакових термодинамічних умовах для всіх гранул. З іншого боку наявність в конструкції заявленого пристрою розподільного елемента у вигляді провальної перфорованої решітки в середній частині кільцевого уловлювача

гранул дозволяє спростити відведення гранул за рахунок їх рівномірного перерозподілу в кільцевому уловлювачі гранул.

Така оптимізація пристрою для гранулювання у зваженому шарі дозволяє зменшити габарити обладнання, енерговитрати на проведення процесу, збільшити ступінь монодисперсності гранулометричного складу отриманого продукту.

На кресленні (рис. 18) наведена схема вихрового гранулятора зваженого шару.

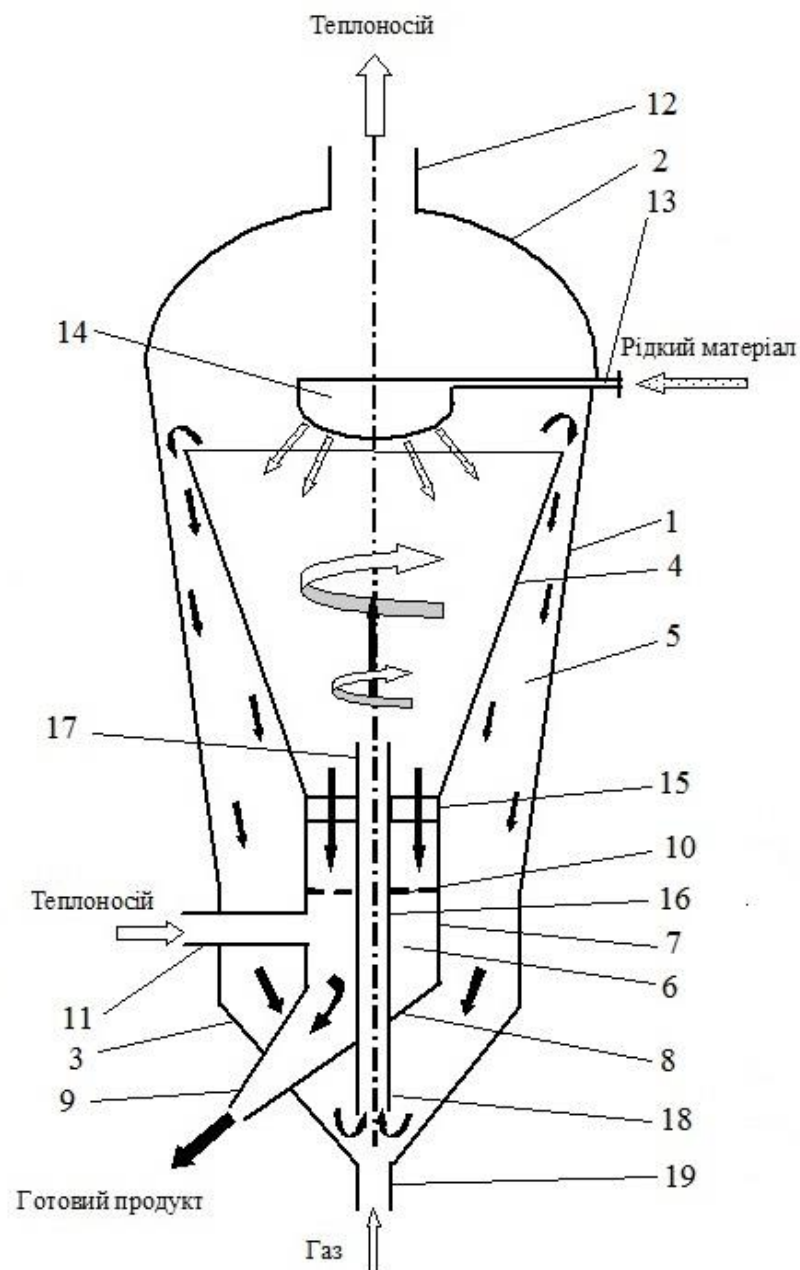


Рис. 18. Конструкція вихрового гранулятора

Пристрій містить основний вертикальний корпус 1 у вигляді конуса, з еліптичною кришкою 2 та конічного днища 3, розташований в середині основного вертикального корпусу 1 концентрично йому і жорстко до нього закріплений додатковий конус 4, останній утворює з основним вертикальним корпусом 1 міжкорпусну кільцеву порожнину 5, яка обмежується меншими основами додаткового конуса 4 і основного вертикального корпусу 1. Кільцевий уловлювач 6 гранул крупної фракції матеріалу виконаний у вигляді циліндра 7 з нахильним днищем 8 і розвантажувальною тічкою 9 для відводу готового продукту. В середній частині кільцевого уловлювача 6 гранул крупної фракції матеріалу встановлено розподільний елемент 10 у вигляді провальної перфорованої решітки. Теплоносій подають в пристрій через патрубок 11, тангенційно з'єднаний з кільцевим уловлювачем 6 гранул. Пристрій також містить патрубок 12 для відведення відпрацьованого теплоносія, виконаний у кришці 2 основного вертикального корпусу 1, патрубок 13 для подачі рідкого вихідного матеріалу з розпилювачем 14, розташований співвісно з додатковим конусом 4. Пристрій має вихровий газорозподільний вузол 15, розташований на одній осі з додатковим конусом 4, а також вертикальний направляючий патрубок 16, розташований на одній осі з додатковим конусом 4. Верхній кінець 17 патрубку 16 розміщений у робочому об'ємі додаткового конуса 4, а нижній кінець 18 у днищі основного вертикального корпусу 1. Патрубок 16 призначений для подачі дрібної фракції матеріалу. Патрубок 19 призначений для подачі газового потоку на ежектування гранул в додатковий конус 4 (внутрішньої циркуляції ретур) і розташований у днищі 3 основного вертикального корпусу 1 на одній осі з вертикальним патрубком 16.

Пристрій працює таким чином.

У пристрій через патрубок 11, з'єднаний з кільцевим уловлювачем 6 тангенційно подається теплоносій і, попередньо проходячи простір циліндра 7, в центральній його частині потрапляє до розподільного елемента 10 у вигляді

провальної перфорованої решітки, після якого рівномірно розподілившись по всьому верхньому перерізу кільцевого уловлювача 6, надходить до вихрового газорозподільного вузла 15. При його проходженні теплоносій закручується навколо вертикальної осі пристрою і набуває спіралеподібного руху. Вихровий вісесиметричний потік теплоносія переміщується вгору по простору додаткового конусу 4 на зустріч матеріалу. Одночасно з цим до утвореного спіралеподібного потоку теплоносія через патрубок 13 до розпилювача 14 підводять рідкий матеріал. Струмінь рідкого матеріалу, що витікає з розпилювача 14, розпадається на окремі гранули сферичної форми. Утворені гранули, контактуючи з вісесиметричним вихровим потоком теплоносія, охолоджуються і кристалізуються та попадають на внутрішню поверхню додаткового конусу 4. В залежності від отриманого розміру, гранули класифікуються на велику та дрібну фракції за рахунок зміни колової й осьової складових швидкості вісесиметричного вихрового потоку теплоносія по висоті додаткового конусу 4 пристрою. Гранули дрібної фракції підхоплюються створеним у додатковому конусі 4 пристрою вісесиметричним вихровим потоком теплоносія та переміщуються до верхнього перерізу додаткового конусу 4 та відводяться з робочого об'єму пристрою через міжкорпусну кільцеву порожнину 5 між додатковим конусом 4 і основним вертикальним корпусом 1. В міжкорпусній кільцевій порожнині 5 гранули дрібної фракції рухаються вниз під дією сили тяжіння і після проходження конічного днища 3 і нижнього перерізу міжкорпусної кільцевої порожнини 5 вони опускаються до нижнього перерізу основного вертикального корпусу 1. У нижній частині основного вертикального корпусу 1 ці гранули потрапляють у зону розрідження, що створюється навколо струменю газового потоку, який входить через патрубок 19, засмоктуються цим струменем і через нижній кінець 18 патрубку 16, переміщуючись по його порожнині, викидаються через верхній кінець 17 у центральну частину робочого простору додаткового конусу 4 у ядро вихрового зваженого шару. Рідкий

матеріал, який потрапляє на поверхню дрібних гранул, кристалізується, при цьому розмір гранул збільшується. Велика фракція не залишає робочий об'єм пристрою і по мірі дорощування та збільшення гранули, циркулюючи об'ємом додаткового конусу 4, переміщуються вниз по його перерізу. При досягненні заданого розміру гранули падають донизу по поверхні додаткового конусу 4, проходять через вихровий газорозподільний вузол 15, циліндричну частину 7 кільцевого уловлювача 6 гранул з розподільним елементом 10 у вигляді провальної перфорованої решітки та нахильне днище 8 кільцевого уловлювача 6 гранул та відводяться з пристрою через розвантажувальну тічку 9. Відпрацьований теплоносій виводиться з основного вертикального корпусу 1 через патрубок 12, розташований у еліптичній кришці 2.

3.2 Створення робочих креслень дослідного зразка вихрового гранулятора

На основі конструкції, що розглянута в попередньому підрозділі, опрацьовано набір конструктивних рішень щодо проектування кожного з вузлів вихрового гранулятора. Розглянута вище конструкція була вдосконалена при створенні робочої конструкторської документації на виготовлення вихрового гранулятора для подальшого проведення стендових досліджень гідро- і термодинамічних умов одержання пористих поверхневого та внутрішніх шарів на гранулах ПАС та визначення фазового складу і кристалічної структури зразків гранул ПАС, визначених календарним планом другого етапу роботи. Опис вдосконалених конструктивних рішень описано нижче. Дослідницька установка являє собою кілька окремих конструкцій. Основна частина обладнання експериментальної установки змонтована на металевій рамі. Рама являє собою суцільнозварну металеву конструкцію, виконану з кутового профілю. Ескіз рами наведено на рис. 19.



Рис. 19. Рама для монтажу обладнання експериментальної установки

У верхній частині рами, встановлюється настил виконується з фанери товщиною 9 мм просоченої лаком з спеціально виконаними отворами для установки і кріплення гранулятора і бункера. Так як гранулятор, з огляду на його конструкції і особливостей обслуговування, монтується на висоті 1,9 м, то рама оснащується сходами і поручнями для забезпечення безпеки проведення робіт на установці. Для запобігання перекидання установки в нижній частині рами передбачені отвори для кріплення рами до фундаменту або іншим фіксуючим конструкціям. Для зручності проведення робіт на установці на рамі передбачено щит для кріплення регулятора температури і вентиля для регулювання подачі розчину на розпилювальний пристрій гранулятора.

Для завантаження і подачі вихідної аміачної селітри в гранулятор в установці передбачений бункер. Бункер являє собою коробчасту конструкцію, що встановлюється на опорах і мають розвантажувальний патрубок, який з'єднується через шиберний затвор з завантажувальним патрубком гранулятора. Ескіз бункера наведено на рис. 20.

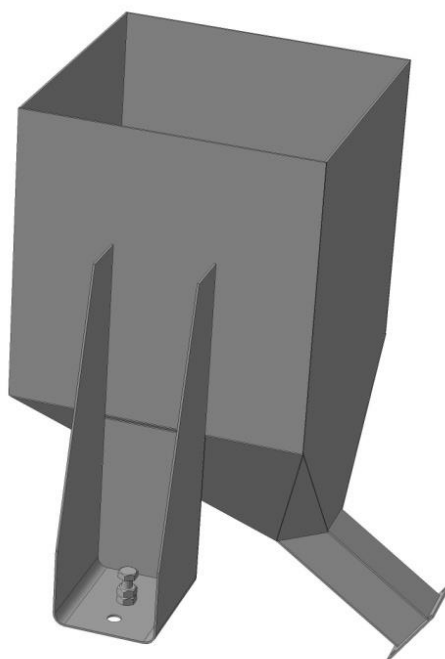


Рис. 20. Бункер завантажувальний

Вихровий гранулятор являє собою модульну конструкцію, що складається їх корпусу, виконаного з нержавіючої сталі і оснащеного оглядовими стеклами, днища, проміжної царги, знімної кришки, газорозподільного пристрою, труби розвантаження, і розпилувального пристрою.

Ескіз гранулятора наведено на рис. 21.

Між днищем і царгою гранулятора встановлена стабілізуюча решітка для стабілізації повітряного потоку перед подачею в газорозподільний пристрій.

Опори гранулятора і бункера оснащені регулювальними болтами для регулювання горизонтальності газорозподільного пристрою гранулятора та сталого становища обладнання на рамі. Конструкція гранулятора виконана таким

чином, що дозволять змінювати конструкцію газорозподільного пристрою, що відрізняється від базового по конфігурації і висоті.

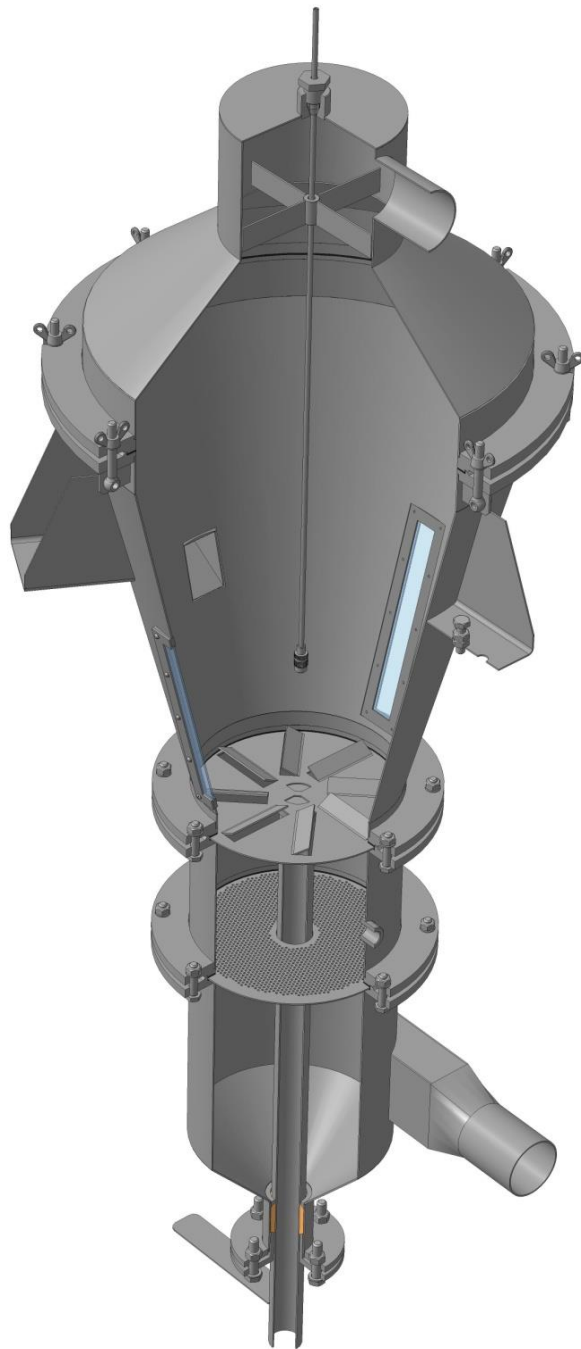


Рис. 21. Ескіз вихрового гранулятора

Газорозподільний пристрій вихрового гранулятора (рис. 22) забезпечує стабільний вихровий рух газового потоку за рахунок встановлених на полотні під кутом лопаток.

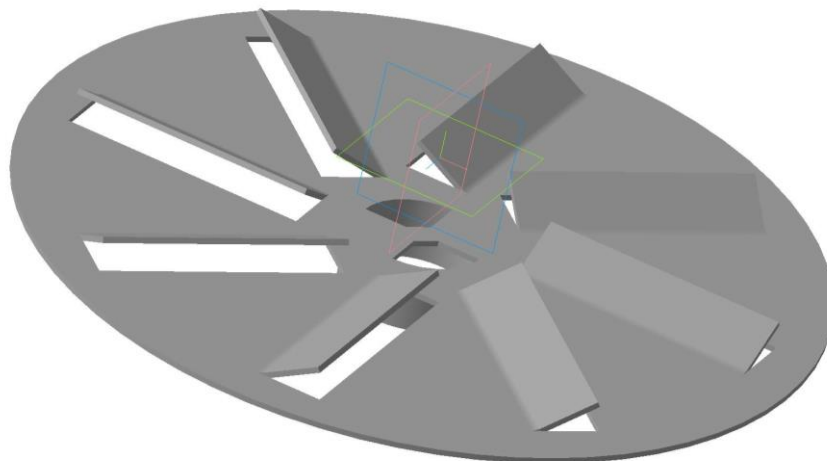


Рис. 22. Газорозподільний пристрій

Введення та рівномірний розподіл газового потоку у вихровий гранулятор забезпечується циліндро-конічним днищем (рис. 23)



Рис. 23. Днище з патрубком тангенційного введення газового потоку у вихровий гранулятор

Корпус гранулятора (рис. 24) виконаний зі змінним по висоті перерізом для забезпечення процесу класифікації гранул за розмірами і сепарації дрібної фракції.



Рис. 24. Корпус

Кришка із штуцером для відведення відпрацьованого теплоносія (рис. 25) виконана конічної форми, щоб забезпечити виконання умов міцності конструкції відповідно до рекомендованих граничних значень тиску.

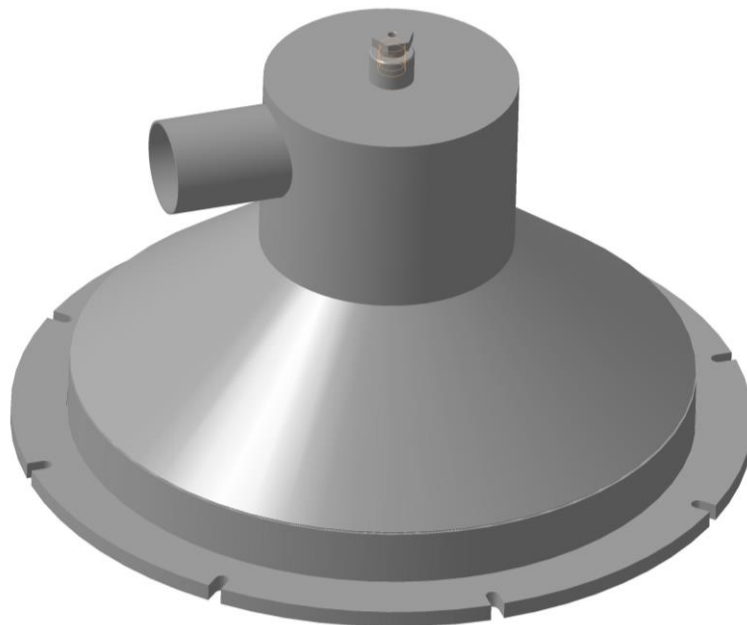


Рис. 24. Кришка

Однією з особливостей даного гранулятора є можливість виникнення фонтануючого шару. В цьому випадку по осі потоку утворюється наскрізний канал, в якому псевдозрідження відбувається не в щільній, а в розрідженій фазі. Газовий потік в гирлі конуса підхоплює частинки і двофазний потік рухається вгору по каналу. Над вільною поверхнею шару утворюється фонтан твердих частинок, які відкидаються в периферійні зони шару. Ці зони при фонтануванні займають зазвичай основну частку поперечного перерізу, осьовий канал - невелику. Утворився канал не має різкого обриси, стінки його безперервно руйнуються і знову відновлюються, причому частинки потрапляють в висхідний газовий потік не тільки біля основи конуса, а й почасти й по всій його висоті. Справа в тому, що високі швидкості в каналі сприяють переміщенню частинок з сповзаючого шару в струмінь висхідного газового потоку. При цьому діаметр каналу кілька збільшується і концентрація частинок в газосуспензії підвищується від низу до верху. Виникнення каналу відбувається поступово: спочатку канал утворюється в нижніх шарах, поблизу вхідного отвору; потім зі збільшенням швидкості канал захоплює все більш високі зони шару і, нарешті, після прориву вільної поверхні утворюється наскрізний канал.

Істотною перевагою апарату конічної форми є можливість обробки твердої фази, дуже неоднорідної за гранулометричним складом, тому що для зрідження великих частинок необхідні значні робочі швидкості, які набагато перевищують швидкості витання дрібних частинок. Справа в тому, що в апараті конічної форми великі частки, внаслідок сепарації, потрапляють переважно в нижню частину шару з високою лінійною швидкістю газу, а дрібні частинки виявляються нагорі, де лінійні швидкості газу нижче.

Ескіз рами з змонтованими на ній гранулятором і бункером наведено на рис.

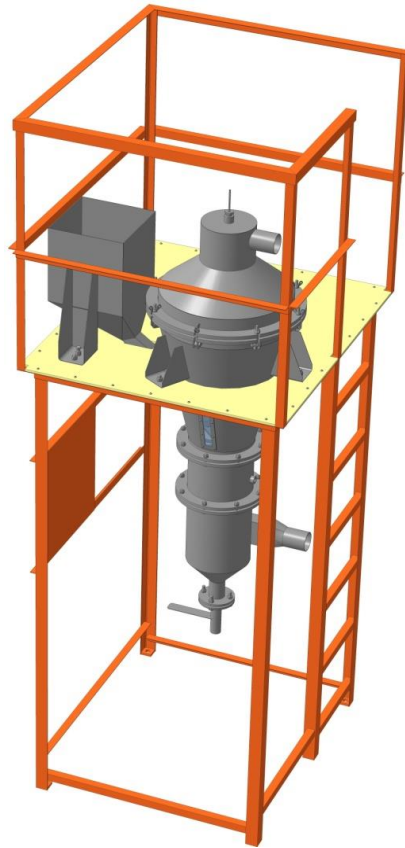


Рис. 26. Дослідна установка

Для подачі рідини в розпилювальний пристрій гранулятора застосовується напірна ємність, ескіз якої наведено на рис. 27.

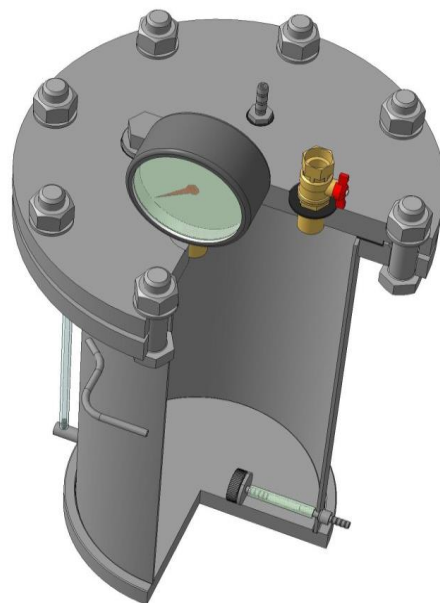


Рис. 27. Напірна ємність

Напірна ємність являє собою циліндричну посудину з відокремлені кришкою, що кріпиться на болтах. У нижній частині ємності є вихідний штуцер з встановленим на ній фільтром для запобігання попадання забруднень в форсунку. На боковій стінці ємності встановлені два Г-подібних штуцера, між якими кріпиться прозора силіконова трубка, що служить рівнеміром. У кришці ємності є 4 технологічних отвори. В один з цих отворів встановлюється манометр з межею вимірювань 0-16 атм і різьбовою приєднувальною частиною (різьблення G 1/2.). Кришка ємності оснащується кульовим запірним вентилям (G 1/2), що дозволяє, в разі необхідності, скинути надмірний тиск в ємності, і різьбовою пробкою, що дозволяє заповнювати ємність розчином через заливальну воронку, не знімаючи кришки. Також в кришці встановлений штуцер для подачі повітря від компресора. Для зручності перенесення, ємність забезпечена двома ручками.

До складу установки входить електрокалорифер сумарною потужністю 150 кВт. Електрокалорифер повинен забезпечувати нагрівання повітря, що нагнітається атмосферного повітря від 15°C до 150°C. Для з'єднання з гранулятором калорифер повинен бути оснащений перехідником з вихідним патрубком із зовнішнім діаметром 76 мм.

Для подачі повітря в гранулятор установка оснащується відцентровим вентилятором високого тиску, який забезпечує витрату повітря в робочих умовах не менше 2500 м³/год при напорі 200 кПа.

Всі кути та переходи між вузлами конструкції, де це можливо, скруглені, що надає пластичного і естетичного вигляду всій складній формі вихрового гранулятора. Пропорційність кожного з вузлів вихрового гранулятора надає його зовнішньому вигляду цілісність і лаконічність. Всі вузли мають мінімально необхідний для забезпечення функціонування технологічний виліт, розташовані в легкодоступних місцях, не чинять перешкод для огляду та ремонту промислового зразка.

Завдяки комплексу об'ємних рішень з оптимізації кожного вузла (за

цільовою функцією «мінімальна витрата матеріалу при забезпеченні необхідної міцності конструкції») при розробці моделі дослідного зразка та застосуванню художньо-конструкторських методів проектування створено композицію вихрового гранулятора яка має виразність, завершеність форм, композиційну цілісність та відповідає високим ергономічним і естетичним показникам.

Робоча конструкторська документація на виготовлення складальних одиниць дослідного зразка вихрового гранулятора наведена у томі 2 звіту.

Комплект робочої конструкторської документації виконано за допомогою системи КОМПАС графік V14 SP2. Для можливості перегляду і роздруківки конструкторської документації рекомендується скористатися безкоштовним додатком КОМПАС VIWER (версія 14 або 15), яке можна завантажити за посиланням <http://support.ascon.ru/download/>

Дослідний зразок вихрового гранулятора повинен забезпечувати отримання гранул ПАС із наступними властивостями:

- рівномірна поверхнева пориста структура з прямолінійними та криволінійними «модифікаційними» порами різного розміру та глибини;
- мінімальна кількість «механічних» пор (до 30 %), які отримано в результаті руйнування гранули у високотурбулізованому потоці теплоносія;
- поглинальна здатність гранул по дизельному паливу – не менше 8%;
- утримувальна здатність гранул по дизельному паливу – не менше 5,6%;
- міцність гранул - не менше 0,4 кг / гранулу.

4 МЕТОДИКА ВИЗНАЧЕННЯ ФАЗОВОГО СКЛАДУ І КРИСТАЛІЧНОЇ СТРУКТУРИ ЗРАЗКІВ ГРАНУЛ ПАС

Дослідження фазового складу зразків проводилось з використанням просвічуючого електронного мікроскопу ПЕМ-125 К у світлопольному та мікродифракційному режимах його роботи без введеної селекторної діафрагми. Прискорююча напруга складала 90 кВ.

Дифракція від вибраної ділянки (мікродифракція). У режимі мікродифракції є можливість отримувати дифракційну картину від вибраної, незначної за розміром ділянки зразка, площа якої менша, ніж при звичайній дифракції. Цей метод дозволяє отримати результати з малої площі зразка, що важливо при дослідженні кристалічної решітки та багатофазних зразків.

Метод світлопольного зображення. Даний метод є звичайним режимом роботи ПЕМ, коли спостерігається на екрані мікроскопа зображення об'єкта.

Під час роботи ПЕМ у цьому режимі зображення формується завдяки пучку електронів, що пройшов через зразок.

Препарування об'єктів для мікроскопічних досліджень.

Для розміщення об'єктів у предметній площині об'єктивної лінзи РЕМ використовують спеціальні сітки у вигляді диска діаметром 3 мм. При даних дослідженнях використано опорні сітки з міді (30x30 мкм) та нікелю (50x50 мкм). Вибір матеріалу плівки-підкладки залежить від природи зразка, матеріалу сітки, задач досліджень, способу препарування, наявності тонкої структури та фону підкладки. Найбільше поширення отримали плівки вуглецю. Для досліджень в рамках статті їх товщина становила 20 нм.

Зразки малих розмірів наносились на опорну сітку з плівкою вуглецю, попередньо закріплену в об'єктотримачі, завдяки диспергації суспензії ультразвуковим методом. Суспензія отримувалась методом розчинення гелю

(порошку) дистильованою водою. Висота від ультразвукового розпилювача до об'єктотримача становила $h \cong 200$ мм та могла варіюватись.

Обробка результатів електронографічних досліджень проводилась за результатами отримання електронограмм за допомогою електронографу за допомогою програмного забезпечення, розробленого в середовищі LabVIEW за методикою [26] (рис. 28), що дозволило збільшити точність вимірювань.

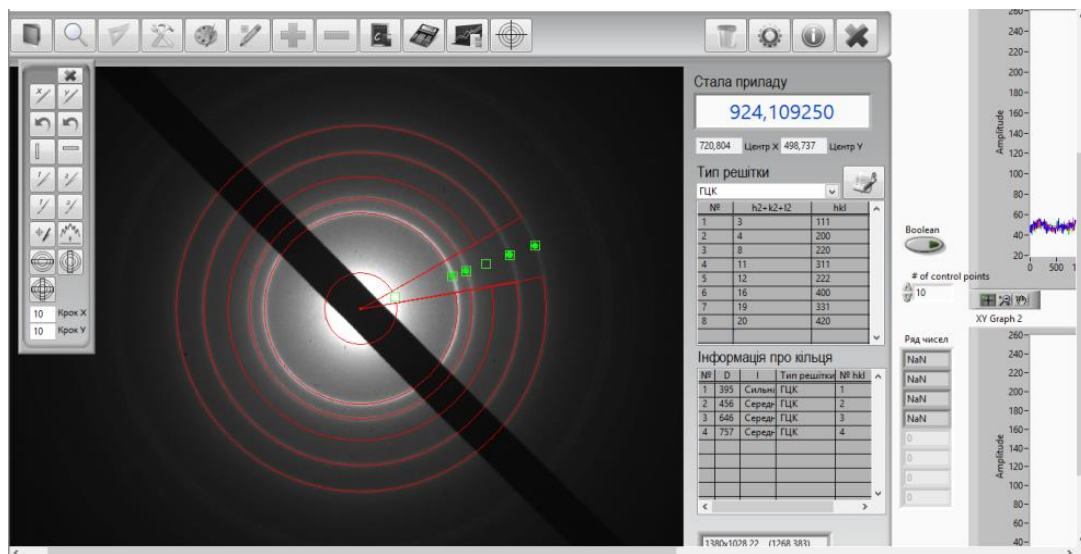


Рис. 28. Зовнішній вигляд робочої панелі програмного забезпечення, розробленого в середовищі LabVIEW для розшифровки електронограм [26]

Алгоритм роботи програми оснований за загальноприйнятій методиці аналізу дифракційних картин [26], яку можна розділити на два етапи. Спочатку визначається стала приладу з використанням еталону. Для цього у програму завантажується зображення дифракційної картини еталонного зразка, проводиться автоматичне знаходження центру електронограми, вибираються необхідні лінії для розрахунку та проводиться розрахунок за допомогою співвідношення

$$C = D_{hkl}^0 \cdot d_{hkl}^0, \quad (1)$$

де d_{hkl}^0 – міжплощинна відстань еталону, D_{hkl}^0 – діаметри дифракційних кілець еталонного зразка.

Як еталон були використані плівки Al товщиною 20-40 нм, міжплощинні відстані якого відомі.

На другому етапі використовувались електронोगрами від експериментальних зразків. Для розшифровки електронोगрами проводяться аналогічні дії (як і у випадку еталонного зразка), до програми завантажується зображення, визначається центр електронोगрами та обираються лінії для розрахунку. Відмінність двох етапів полягає у розрахунку міжплощинних відстаней та параметрів кристалічної решітки безпосередньо для експериментального зразка з використанням діаметру його дифракційних кілець та сталої приладу. Розрахунок параметрів решітки проводився за допомогою відомих співвідношень

$$d_{hkl} = \frac{C}{D_{hkl}}, \quad (2)$$

$$a_{hkl} = d_{hkl} \sqrt{h^2 + k^2 + l^2}, \quad (3)$$

де D_{hkl} – діаметри дифракційних кілець невідомого зразка; d_{hkl} – міжплощинна відстань невідомого зразка; h, k, l – індекси Міллера.

При інтерпретації результатів розшифровки електронограм використовувалися відомі табличні дані про величину міжплощинних відстаней та відносну інтенсивність ліній на дифрактограмах.

Спектри Рамана вимірювали при кімнатній температурі, використовуючи лазерне збудження Ar green ($\lambda=514\text{нм}$). Досить якісні спектри були отримані із часом експозиції 40 с та щільністю потужності збудження лазером $338,9 \text{ Вт/см}^2$.

Дослідження кристалічної структури зразків

За результатами мікроскопії визначається:

- загальна просторова будова поверхні і приповерхневих шарів гранули ПАС;
- скол гранули та її внутрішня кристалічна структура;
- основні зони локалізації пор;
- структура пор і їх природа;

- кількісний розподіл різних типів пор на одиницю площі досліджуваного зразка.

Для визначення структурних особливостей отриманих зразків був використаний метод рентгеноструктурного аналізу. Отримання спектрів проводилося на рентгенодіфрактометрі «ДРОН-3» в K_α випромінюванні мідного анода ($\lambda = 0,154$ нм, $U = 40$ кВ, $I = 20$ мА). Вимірювання здійснювалося методом безперервної реєстрації в діапазоні кутів 2θ від 10° до 60° , де 2θ - кут Вульфа-Брегга.

Отримані дифрактограми нормувалися на інтенсивність піка (020), оскільки для всіх зразків незалежно від методу обробки він має найбільшу інтенсивність. Фазовий аналіз проводився шляхом зіставлення відносних інтенсивностей від досліджуваних зразків і еталоном за даними JCPDS (картка № 00-047-0867).

Якість текстури плівок оцінювалася за методом Харріса. Полісна щільність при цьому розраховувалася за формулою [27]:

$$P_i = \frac{(I_i / I_{0i})}{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (I_i / I_{0i})}, \quad (4)$$

де I_i, I_{0i} – інтегральні інтенсивності i -го дифракційного піку для зразка і еталона; N - кількість ліній, які присутні на дифрактограмі.

Ось текстури має ті індекси, яким відповідає найбільше значення P_i . В цьому випадку орієнтаційний фактор для відповідного зразка може бути знайдений за виразом [27]:

$$f = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (P_i - 1)^2}. \quad (5)$$

Середній розмір областей когерентного розсіювання L визначається за формулою Шерера [26,27]:

$$L = \frac{0,94 \cdot \lambda}{\beta \cdot \cos \theta} \quad (6)$$

де β – фізичне розширення відповідних рентгенівських ліній.

Дослідження морфології поверхні та внутрішньої структури гранул (лінійний розмір і форма пор, мікрорельєф поверхні різних об'єктів): скануючий електронний мікроскоп SEO-SEM Inspect S50-B.

Особливості SEO-SEM Inspect S50-B:

- енергодисперсійний спектрометр AZtecOne з детектором X-MaxN20 (виробник Oxford Instruments plc);

- джерело електронів у гарматі: вольфрамовий катод з випромінюванням термоелектронів.

Спектри FTIR були отримані методом ATR за допомогою FT-IR спектрометра Nicolet iS50 (від Thermo Scientific) у діапазоні від 4000 до 400 cm^{-1} з роздільною здатністю 4 cm^{-1} (кількість сканів: 32) (чутливість для знаходження піків була 95 %).

Для досліджень було обрано тринадцять зразків для дослідження (позначення та нумерація зразків - відповідно до позначення на спектрах FTIR у відповідному розділі):

1. Гранули рядової аміачної селітри (два зразки):

- гранули аміачної селітри (з заводської упаковки) - sample 1b;
- вихідні гранули аміачної селітри (прогріті протягом 5 хвилин) - sample 2.

2. Гранули ПАС після зволоження та термообробки у вихровому грануляторі (одинадцять зразків):

- гранули, зволожені водою і просушені 9 хвилин - sample 3;
- гранули, зволожені водним розчином карбаміду і просушені 5 хвилин - sample 4;
- гранули, повторно зволожені водним розчином карбаміду і просушені 7 хвилин - sample 5;
- гранули, зволожені водним розчином аміачної селітри і просушені 6

хвилин - sample 6;

- гранули, повторно зволожені водним розчином аміачної селітри і просушені 6 хвилин - sample 7b;

- гранули, повторно зволожені водним розчином аміачної селітри і просушені 20 хвилин - sample 8;

- гранули, зволожені водним розчином карбаміду і аміачної селітри, просушені 6 хвилин - sample 9;

- гранули, повторно зволожені водним розчином карбаміду і аміачної селітри, просушені 6 хвилин - sample 10;

- гранули, зволожені водним розчином карбаміду, аміачної селітри і триполіфосфату натрію, просушені 6 хвилин - sample 11;

- гранули, зволожені водним розчином карбаміду, аміачної селітри і гексаметафосфата натрію, просушені 6 хвилин - sample 12;

- гранули, зволожені водним розчином карбаміду і гексаметафосфата натрію - sample 13.

Температура процесу термообробки - 105-110 ° С.

Таким чином, для порівняльного аналізу пропонується:

1. Рядова аміачна селітра.
2. ПАС, отримана способом термообробки.
3. ПАС, отримана висушуванням гранул з пороутворюючою речовиною (водою).
4. ПАС, отримана способом зволоження і термообробки при різних типах зволожувача, різному часі термообробки і різній кількості циклів зволоження.

5 МЕТОДИКА ПРОВЕДЕННЯ ДОСЛІДЖЕНЬ ГІДРО- І ТЕРМОДИНАМІЧНИХ УМОВ ОДЕРЖАННЯ ПОРИСТИХ ПОВЕРХНЕВОГО ТА ВНУТРІШНІХ ШАРІВ НА ГРАНУЛАХ ПАС

5.1 Опис експериментального зразка вихрового гранулятора

Вихровий гранулятор представляє собою модульну конструкцію, що складається їх корпусу, виконаного з нержавіючої сталі і оснащеного оглядовими стеклами, днища, проміжної царги, відокремлені кришки, газорозподільного пристрою, труби розвантаження, і розпилювального пристрою.

Ескіз гранулятора наведено на рис. 29.

Між днищем і царгою гранулятора встановлена стабілізуюча решітка для стабілізації повітряного потоку перед подачею в газорозподільне пристрій.

Опори гранулятора і бункера оснащені регулювальними болтами для регулювання горизонтальності газорозподільного пристрою гранулятора та сталого становища обладнання на рамі. Конструкція гранулятора виконана таким чином, що дозволять змінювати конструкцію газорозподільного пристрою, що відрізняється від базового по конфігурації і висоті.

Принцип дії гранулятора наступний. В апарат через відповідний штуцер механічним способом подається ретур з бункера, попередньо пройшовши дозування. Подача зернистого матеріалу здійснюється циклічно, циклічне і вивантаження. Підведення тепла в псевдозріджений шар здійснюється зі зріджуючим повітрям, яке нагрівається в калорифері. Повітря проходить розподільний пристрій, входить в корпус апарату і бере участь в утворенні псевдозрідженого шару. Механізм утворення псевдозрідженого шару можна, в найпростішому випадку, представити таким чином. При подачі через розподільну решітку від низу до верху потоку газу з малою швидкістю шар

ретуру залишається нерухомим. Якщо поступово збільшувати швидкість газу до величини, при якій вага зернистого матеріалу в шарі врівноважується силою гідродинамічного тиску висхідного потоку, тверді частинки знаходяться в гідродинамічній рівновазі, тобто шар стане текучим і отримує деякі інші властивості крапельної рідини. З подальшим збільшенням швидкості газу шар розширюється, інтенсивність руху частинок зростає, але без порушення гідродинамічної рівноваги. Нарешті, після досягнення швидкості газу, при якій сили гідродинамічного тиску стають більше сили тяжіння, частки виносяться з шару. Швидкість газу, при якій нерухомий шар зернистого матеріалу переходить в псевдозріджений стан, називається швидкістю початку псевдозрідження (або першої критичної). Швидкість газу, при якій тверді частинки виносяться з шару, називається швидкістю винесення (або другою критичною). Таким чином, діапазон псевдозрідження обмежений першою і другою критичною швидкістю. Якщо швидкість газу незначно перевищує швидкість початку псевдозрідження, то рух частинок виражено слабо - шар знаходиться в стані спокійного псевдозрідження. Зі збільшенням швидкості газу в шарі починають з'являтися невеликі бульбашки, що підвищують інтенсивність перемішування частинок. Вільна поверхня шару в цьому випадку окреслена досить різко, отримуючи порівняно невеликі коливання. Такий шар отримав назву власне киплячого шару. При подальшому збільшенні швидкості газу зростає розмір бульбашок. Останні, піднімаючись зазвичай з більшою швидкістю, ніж інша частина газу, різко турбулізують систему. У цьому випадку говорять про шар з барботажем бульбашок. Вільна поверхня такого шару зазнає значних коливань; бульбашки, що виходять із шару, проривають цю поверхню, утворюючи над нею сплески матеріалу. Нарешті, подальше збільшення швидкості газу проводить до повного розмивання вільної поверхні шару і винесення твердих частинок.

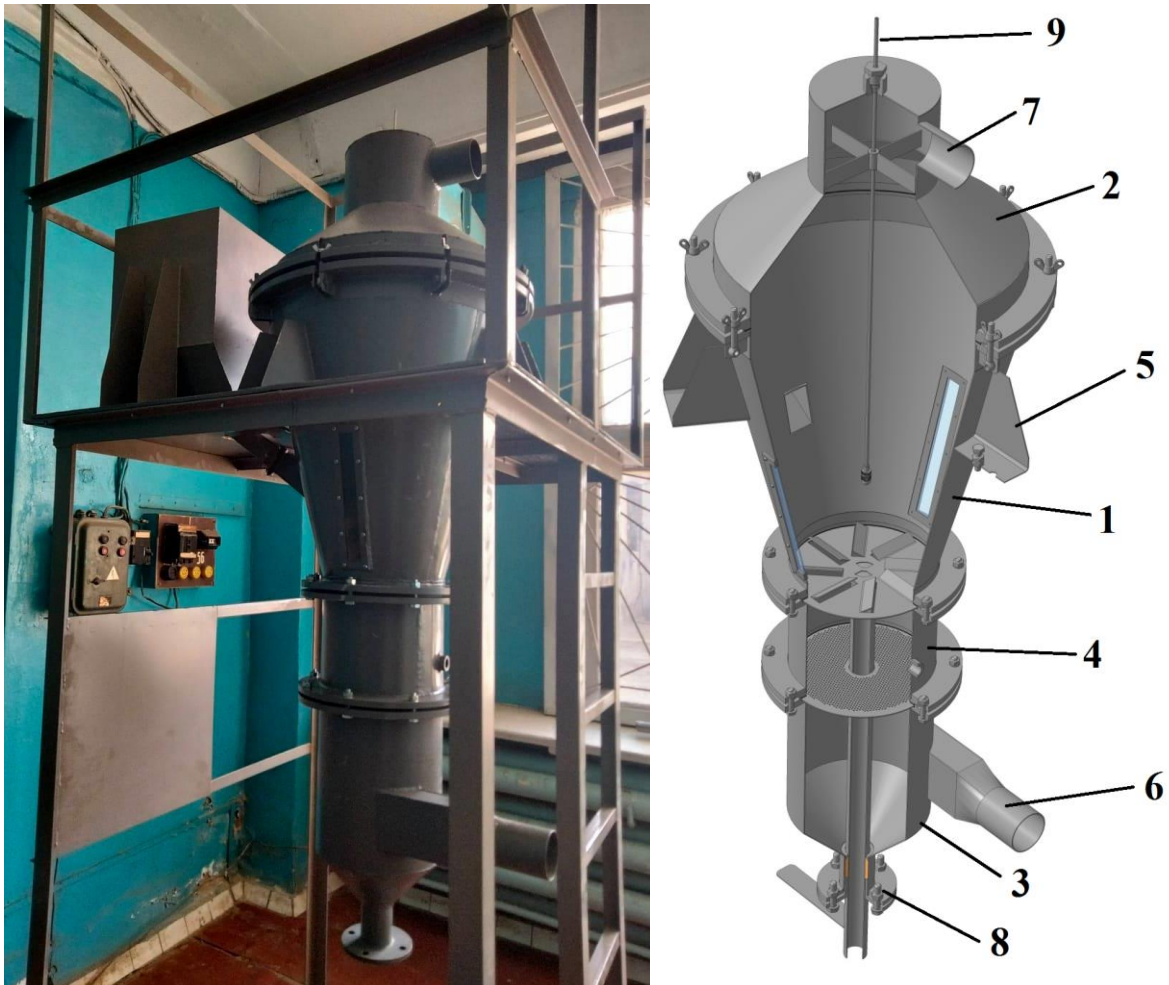


Рис. 29. Вихровий гранулятор: 1 – корпус; 2 – кришка; 3 – нижнє днище; 4 – вставка; 5 – опора-лапа; 6 – штуцер для введення потоку теплоносія; 7 – штуцер для відведення відпрацьованого теплоносія; 8 – штуцер для відведення гранул товарної фракції; 9 – штуцер для підведення стисненого повітря на розпилення

Зволожувач подається зі змішувача через відповідний штуцер в форсунку і розпилюється пневматичним способом на дзеркало псевдозрідженого шару. Пневматичний спосіб подачі розплаву досить ефективний, оскільки відбувається хвилеподібне викривлення поверхні шару, при якому різко збільшується площа контакту двох зустрічних потоків і тим самим інтенсифікуються процеси тепло- і масообміну. При подачі розплаву на шар зрошення його поверхні має бути рівномірним по всій площі. Продуктивність форсунки обмежена площею дзеркала шару. Подача розчину більш компактна в апаратурному оформленні та

дозволяє значно ефективніше використовувати інформацію, що вводиться тверду фазу, оскільки вона відразу перемішується з рідким і бере участь в процесі гранулоутворення до винесення з шару.

Формування псевдозрідженого шару і диспергування зріджуючого агента відбуваються в зоні, що безпосередньо примикає до розподільного пристрою (активна зона). Саме тут в основному завершуються процеси тепло- і масообміну.

У корпусі гранулятора при взаємодії зволожувача і псевдозрідженим шаром, утвореного повітрям з ретурю відбувається кристалізація тонких плівок на поверхні ретурю в результаті їх зневоднення та охолодження. Краплі зволожувача контактують з потоком теплоносія, охолоджуються і кристалізуються.

Вивантаження готових гранул здійснюється з нижньої частини шару. Нижнє вивантаження готового продукту обумовлене тим, що є можливість видалення з шару випадково утворених грудок і неможливе вивантаження в якості готового продукту більш дрібної фракції, як це було б при вивантаженні з поверхні псевдозрідженого шару (вивантаження дрібної фракції в цьому випадку обумовлено сепарацією в шарі).

Однією з особливостей даного гранулятора є можливість виникнення фонтануючого шару. В цьому випадку по осі потоку утворюється наскрізний канал, в якому псевдозрідження відбувається не в щільній, а в розрідженій фазі. Газовий потік в корпусі підхоплює частинки і газодисперсна система рухається вгору по каналу. Над вільною поверхнею шару утворюється фонтан твердих частинок, які відкидаються в периферійні зони шару. Ці зони при фонтанування займають зазвичай основну частку поперечного перерізу, осьовий канал - невелику. Утворений канал не має різких кордонів, стінки його безперервно руйнуються і знову відновлюються, причому частинки потрапляють в висхідний газовий потік не тільки біля основи конуса, а й частково й по всій його висоті.

Високі швидкості в каналі сприяють переміщенню частинок з сповзаючого шару в струмінь висхідного газового потоку. При цьому діаметр каналу кілька збільшується і концентрація частинок в газодисперсній системі підвищується від низу до верху. Виникнення каналу відбувається поступово: спочатку канал утворюється в нижніх шарах, поблизу вхідного отвору; потім зі збільшенням швидкості канал захоплює все більш високі зони шару і, нарешті, після прориву вільної поверхні утворюється наскрізний канал.

Окрім іншого, дану конструкцію гранулятора відрізняє те, що підігріте повітря подається в гранулятор не через газорозподільну решітку, а через газорозподільний апарат, який забезпечує газу обертальний рух і створює висхідний вихровий потік газу в корпусі апарату. Це забезпечує обертальний рух гранул в грануляторі, інтенсифікацію процесу сушіння гранул.

Акт про виготовлення дослідного зразка вихрового гранулятора для одержання гранул пористої аміачної селітри наведений в додатку А до цього звіту.

Експериментальні дослідження в рамках технічного завдання за другим етапом роботи також були проведені на експериментальному зразку вихрового гранулятора, будова якого наведена на рис. 30.

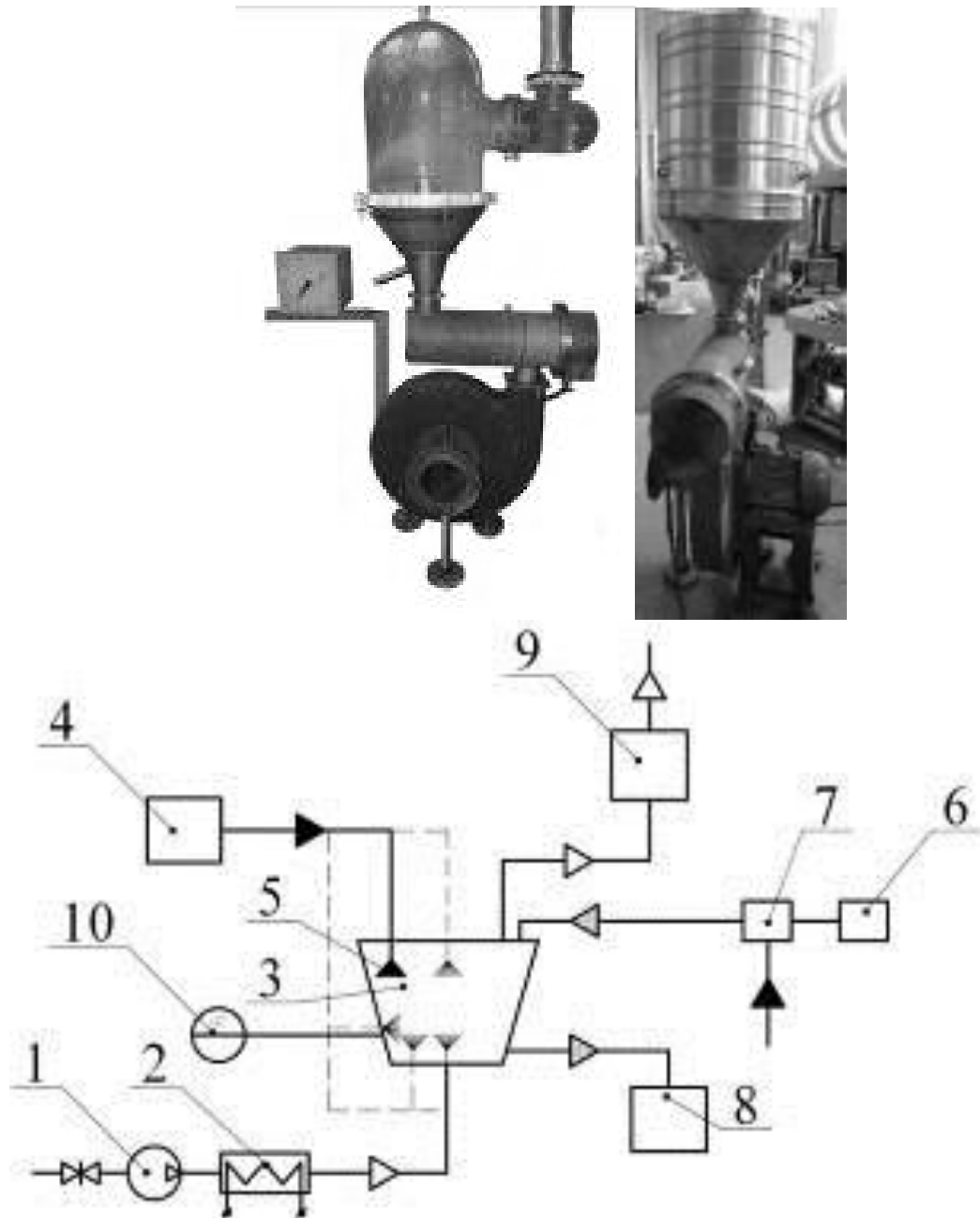


Рис. 30. Установа дослідження гідродинаміки робочого простору вихрового гранулятора, термодинамічних умов одержання гранул (з різною конфігурацією робочого простору): 1 – газодувка; 2 – калорифер; 3 – вихровий гранулятор; 4 – ємність для приготування зволожувача; 5 – форсунка; 6 – ємність гранул; 7 – ємність попереднього зволоження (використовується при зволоженні); 8 – ємність готових гранул; 9 – ступінь очищення газів, що відходять (барботер); 10 – реєструючий потенціометр. Пунктирною лінією показані варіанти установки форсунки.

5.2 Прилади та обладнання. Методи і схеми вимірювань

Прилади та обладнання:

- визначення гідродинамічних характеристик руху потоків – термоанемометр TES-1340;
- вимірювання температури повітря – ртутний термометр;
- вимірювання витрати повітря, співвідношення витрат на створення висхідного та тангенційного потоків повітря (для апаратів з комбінованим зваженим шаром гранул) – камерна діафрагма, вимірювальний перетворювач перепаду тиску;
- вимірювання витрати води, що надходить до ємності для приготування розчину (розплаву) – ротаметр
- вимірювання температури в калорифері – термопара ТС10-С; потенціометр реєструючий самопишучий КСП-3;
- вимірювання температури в робочому просторі гранулятора – тепловізор Fluke Ti25, пірометр Victor 305В;
- вимірювання вологості гранул і повітря – мультиметр DT-838, діелькометричний вологомір ИВДМ-2С.

Вищезазначені прилади контролю та регулювання пройшли відповідні випробування згідно з загальноприйнятими методиками. Експериментальні стенди обладнано пультами управління пускорегулювального обладнання. Методика проведення замірів та опис замірів спираються на рекомендації [28-33].

Основні схеми вимірювань наведені на рисунках, що представлені нижче.

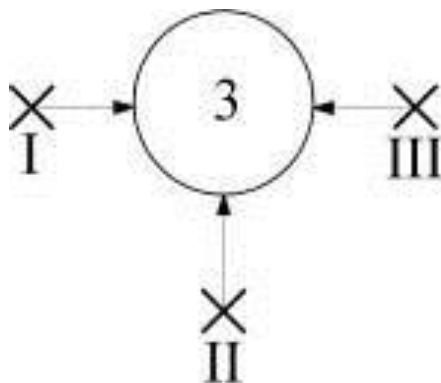


Рис. 31. Схема вимірювання температури тепловізором: 3 – вихровий гранулятор; I, II, III – точки виміру температури.

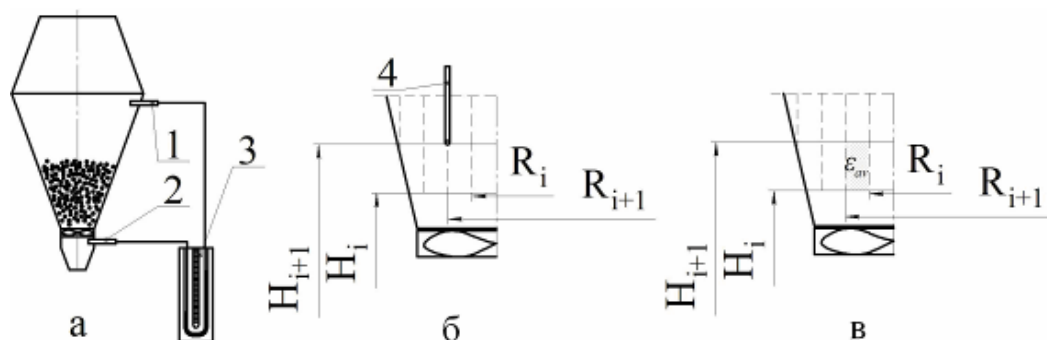


Рис. 32. Схема проведення експериментальних досліджень: а – визначення гідравлічного опору; б – визначення швидкості газового потоку; в – визначення порізності псевдозрідженого шару; 1,2 – трубки Піто; 3 – U-подібний дифманометр; 4 – термоанемометр TES-1340

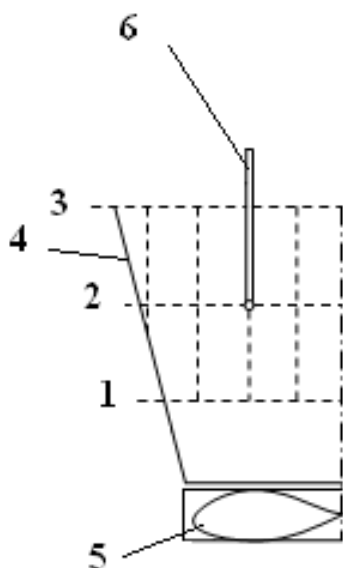


Рис. 33. Схема зондування вихрового гранулятора: 1, 2 – проміжні перерізи; 3 – вихідний переріз; 4 – робочий об'єм пристрою; 5 – завихрювач; 6 – термоанемометр.

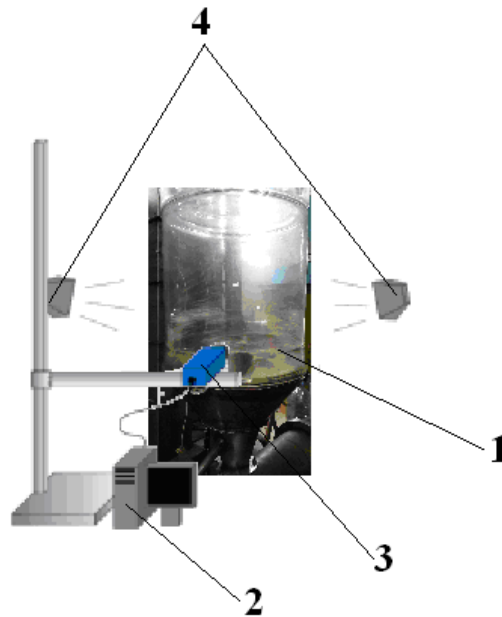


Рис. 34. Дослідження швидкості і траєкторії руху гранул з допомогою відео- та фотозйомки: 1 – вихровий гранулятор; 2 – персональний комп'ютер; 3 – високошвидкісна відеокамера; 4 – підсвітка

5.3 Статистична обробка результатів експериментальних досліджень.

Розрахунок похибки вимірювань та обробки експериментальних даних щодо основних гідродинамічних і кінетичних характеристик взаємодіючих потоків у робочому просторі експериментальних зразків вихрових грануляторів із зваженим шаром ґрунтується на перевірених в хімічній технології методиках, алгоритмах та рекомендаціях [29,30] щодо визначення та обробки дослідних даних для інженерного експерименту в гідроаеромеханіці і дослідженні тепломасообмінних процесів. Алгоритм визначення похибки вимірів експериментальних величин та результатів проведених розрахунків наводиться нижче.

Для визначення необхідної (оптимальної) кількості проведених дослідів та для досягнення максимального ступеня точності й достовірності отриманих результатів, а також обробки цих результатів використано методи теорії кореляції для вивчення статистичних залежностей [34,35].

Під час здійснення експериментальних досліджень можуть виникати помилки (похибки) двох родів – випадкова та систематична [35,36].

Випадкова помилка зменшує точність результатів експерименту. Аналіз такого роду помилки та оцінка її впливу на результати обробки даних стає можливою за умов використання середньоквадратичного відхилення σ , що обчислюється за формулою [34]:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\bar{x} - x_i)^2}{n-1}}, \quad (7)$$

де \bar{x} – середнє арифметичне значення параметра; x – значення окремого параметра; n – кількість вимірювань.

Максимально можлива помилка окремого вимірювання обчислюється за правилом трьох сигм [34]

$$\Delta = 3\sigma. \quad (8)$$

Двосторонній довірчий інтервал середнього арифметичного значення ε обчислюється за залежністю, наведеною в [33] при умові ймовірності потрапляння в довірчий інтервал 95%

$$\varepsilon = t_p \frac{\sigma}{\sqrt{n}}, \quad (9)$$

де t_p – критерій (поправка) Стьюдента [34,35].

Середньоквадратична похибка непрямих вимірів [36]

$$\sigma_y = \sqrt{\sum_{i=1}^n \left(\frac{\partial y}{\partial x} \cdot \Delta \cdot x_i \right)^2}. \quad (10)$$

де $y = f(x_1, x_2, \dots, x_n)$.

Точність отриманих рівнянь регресії визначалась за методом найменших квадратів [14,15].

6 ПРОТОКОЛ ДОСЛІДЖЕНЬ ГІДРО- І ТЕРМОДИНАМІЧНИХ УМОВ ОДЕРЖАННЯ ПОРИСТИХ ПОВЕРХНЕВОГО ТА ВНУТРІШНІХ ШАРІВ НА ГРАНУЛАХ ПАС ТА ВИЗНАЧЕННЯ ФАЗОВОГО СКЛАДУ І КРИСТАЛІЧНОЇ СТРУКТУРИ ЗРАЗКІВ ГРАНУЛ ПАС

6.1 Фізична модель руху потоків

Основними чинниками, що впливають на течію в робочому об'ємі зі змінною за висотою площею поперечного перерізу, є геометричні параметри (кут розкриття дифузора або конфузора, площа його нижнього та верхнього перерізів) і умови на вході (витрата газового потоку, інтенсивність закручування потоку, спосіб створення закрученого газового потоку або тип газорозподільного пристрою).

Рух газового потоку після виходу з газорозподільного пристрою набуває виражену спіралеподібну траєкторію, стабільність якої визначається конструкцією газорозподільного пристрою. Кількість витків спіралі та висота кожного витка (що може змінюватись по мірі переміщення газового потоку до верхнього перерізу робочого простору вихрового гранулятора) також залежить від умов початкової закрутки. Основний напрямок руху гранул співпадає з напрямком руху газового потоку за рахунок передачі поменту кількості руху до гранул від суцільної фази.

Для моделювання двофазних течій, в яких гранули є дисперсною фазою, використовується підхід Лагранжа. На основі цього методу розглядається рух дисперсної фази під дією суцільної фази. З іншого боку, на відміну від руху газового потоку, обов'язковим при описі руху гранул є аналіз діючих на дисперсну фазу сил. Окрім того, в умовах стисненого руху гранул необхідно враховувати зміну траєкторії дисперсної фази та часу її перебування у робочому просторі вихрового гранулятора.

В робочому просторі вихрового гранулятора слід виділити три зони руху газового потоку і гранул по висоті та три зони по радіусу пристрою (рис. 35). В кожній з зон інтенсивність руху газового потоку і гранул визначається складовими швидкості та переважним напрямом сумарної швидкості.

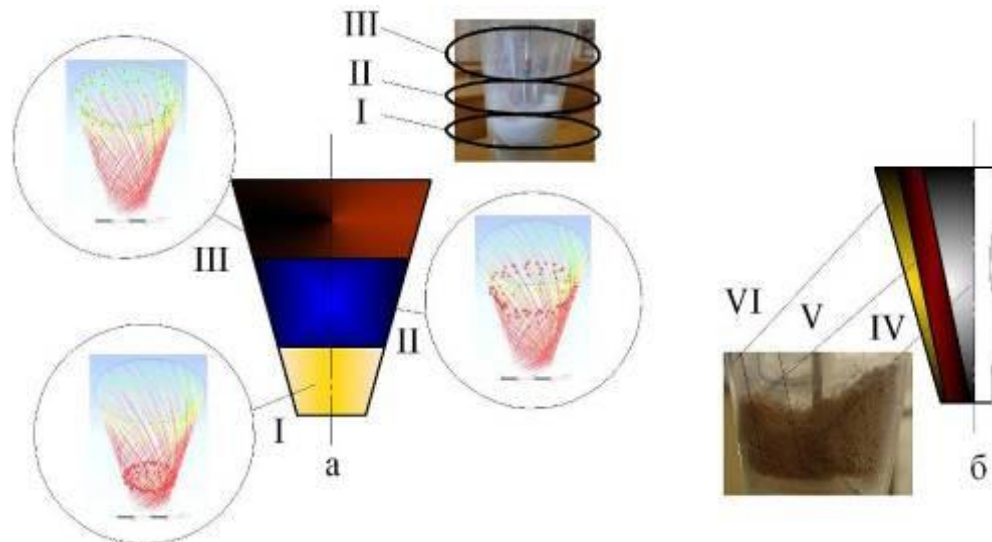


Рис. 35. Основні зони руху гранул у вихровому грануляторі: а – за висотою робочого простору; б – за радіусом робочого простору; I – зона переважного вихрового руху гранул; II – зона комбінованого вихрового та висхідного руху гранул; III – зона переважного висхідного руху гранул; IV – зона дії висхідного газового потоку зріждуючого агента; V - зона формування вихрового зваженого шару; VI - зона зниженої інтенсивності (гальмування) руху вихрового зваженого шару

Межі цих зон визначаються переважанням окремої складової швидкості руху газового потоку в сумарній швидкості, визначеної за правилом паралелепіпеда.

При вільному русі гранули час її перебування в робочому просторі гранулятора визначається рішенням диференціального рівняння руху гранули у вертикальному напрямі. В умовах стисненого руху гранули коефіцієнт стисненості і час перебування гранули визначається окремо для зон I, II, III. Висота зон I, II, III і ширина зон IV, V, VI визначається умовами початкової закрутки газового потоку та об'ємним вмістом гранул у робочому просторі

вихрового гранулятора.

Класичний псевдозріджений шар можна охарактеризувати середнім значенням порізности $\varepsilon_{сер}$. У вихровому псевдозрідженому шарі визначити значення $\varepsilon_{сер}$ важко, тому що розподіл гранул по радіусу і висоті гранулятора нерівномірно. Це пов'язано з наявністю градієнта витратної (змінюється по висоті гранулятора) і колової (змінюється по радіусу гранулятора) складових повної швидкості газового потоку. В об'ємі гранулятора за результатами експериментальних досліджень можна виділити характерні зони розподілу гранул у міру віддалення від осі апарату і від газорозподільного пристрою (рис. 36).

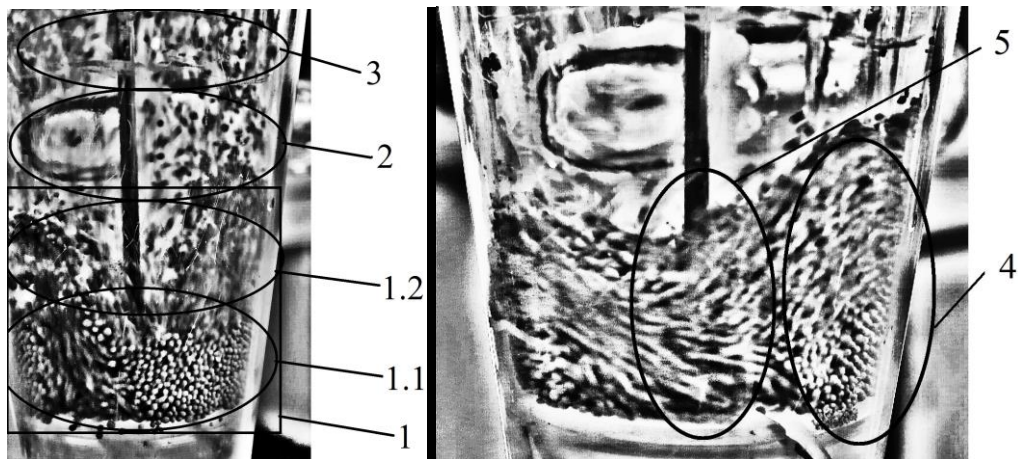


Рис. 36. Зони розподілу гранул у вихровому грануляторі: 1 - «активна» зона; 1.1 - зона переважуючого вихрового руху; 1.2 - зона зниження активності вихрового руху; 2 - зона переважуючого висхідного руху; 3 - зона сепарації (висхідний рух гранул); 4 - зона зниженої порізности псевдозрідженого шару; 5 - зона підвищеної порізности псевдозрідженого шару

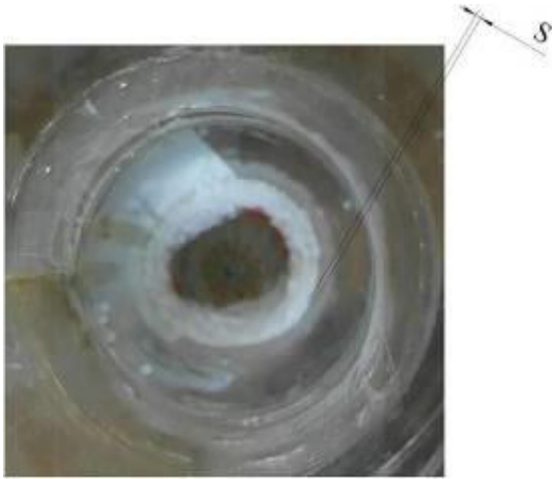


Рис. 37. Явище руху гранул щільним кільцем на деякій відстані S від стінки гранулятора

значної різниці тисків у центрі і на периферії (рис. 38); ця різниця тисків спричиняє протидію відцентровій силі. В подальшому це явище може бути використано для уникання контакту гранул зі стінкою корпуса гранулятора і запобігання процесу руйнування гранул шляхом стирання.

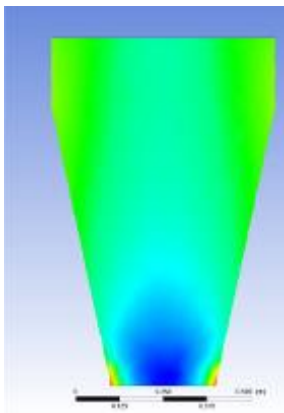


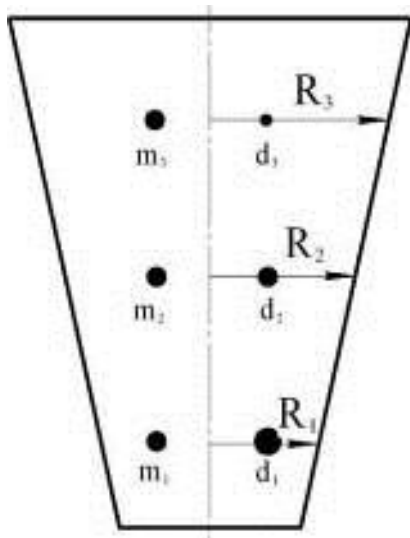
Рис. 38. Заливка поля тиску у робочому просторі вихрового гранулятора

Особливістю грануляторів, що досліджуються, є змінна за висотою площа поперечного перерізу робочого простору. Гранулятори з постійною площею поперечного перерізу не забезпечують в повній мірі процеси розподілу гранул за розмірами та сепарацію нетоварної фракції в об'ємі гранулятора [37]. Це пояснюється тим, що в робочому просторі вихрового гранулятора зберігається постійність висхідної швидкості газового потоку, яка відповідає робочій швидкості руху гранули (або фракції гранул у вузькому діапазоні). Проводити процеси класифікації гранул в апаратах з постійною площею поперечного перерізу можливо у разі введення газу до апарату кількома потоками з розташуванням місць введення на різних висотних позначках. Такий спосіб

Під час дослідження траєкторій руху гранул встановлено, що в зоні I при інтенсивній початковій закрутці газового потоку спостерігається явище руху гранул щільним кільцем на деякій відстані S від стінки гранулятора (рис. 37). Це явище можна пояснити наявністю в робочому просторі вихрового гранулятора

значної різниці тисків у центрі і на периферії (рис. 38); ця різниця тисків спричиняє протидію відцентровій силі. В подальшому це явище може бути використано для уникання контакту гранул зі стінкою корпуса гранулятора і запобігання процесу руйнування гранул шляхом стирання.

класифікації є досить енергоємним та широкого застосування не набув.



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

Рис. 39. Розподілення гранул за розмірами і масою в робочому просторі вихрового гранулятора

на необхідну кількість фракцій і провести сепарацію дрібних частинок (рис. 39).

Використання грануляторів зваженого шару зі змінною площею поперечного перерізу робочої камери і внутрішньою циркуляцією ретурна дозволяє здійснювати процеси класифікації полідисперсної системи широкого фракційного складу на початкових етапах vormування псевдо зрідженого шару. Завдяки створенню в робочому об'ємі апарата різних гідродинамічних умов руху газового потоку на різних висотних відмітках стає можливо класифікувати гранули

6.2 Аеродинаміка газового потоку

Зважаючи на відомий квадратичний закон зміни витратної швидкості за радіусом у визначеному перерізі апарату [38] запишемо наступне рівняння:

$$V_z(r) = ar^2 + br + c. \quad (11)$$

Перша похідна (11)

$$2ar + b = 0. \quad (12)$$

За умови $r=0$ $b=0$ і, таким чином, інтегрування формули (12) в діапазоні $r \in [0; R]$ дає наступний результат

$$Q = 2\pi \left(\frac{1}{4} aR^4 + \frac{1}{2} cR^2 \right). \quad (13)$$

При $r = R$ $V_r(r, z) = 0$, тому

$$0 = aR^2 + c; \quad a = -\frac{c}{R^2}. \quad (14)$$

Таким чином, з урахуванням (14) рівняння (13) запишеться у вигляді

$$Q = \frac{1}{2} \pi c R^2. \quad (15)$$

Враховуючи, що для конічної форми робочого простору вихрового гранулятора за умов $r \in [0; R]$ залежність радіуса твердої стінки від висоти має вигляд $R = f(z) = \text{tg} \varphi \cdot z$, а також визначивши з (15) значення $c = \frac{2Q}{\pi R^2}$ рівняння (11) запишеться у вигляді

$$V_z(r, z) = -\frac{2Qr^2}{\pi \text{tg}(\varphi)^4 z^4} + \frac{2Q}{\pi \text{tg}(\varphi)^2 z^2}. \quad (16)$$

Після одержання значення $V_z(r, z)$ з рівняння нерозривності потоку [39.40] з урахуванням, що $\frac{\partial V_z(r, z)}{\partial z} = \frac{8Qr^2}{\pi \text{tg}(\varphi)^4 z^5} - \frac{4Q}{\pi \text{tg}(\varphi)^2 z^3}$ буде мати вигляд

$$\frac{\partial}{\partial r} V_r(r, z) + \frac{8Qr^2}{\pi \text{tg}(\alpha)^4 z^5} - \frac{4Q}{\pi \text{tg}(\alpha)^2 z^3} + \frac{V_r(r, z)}{r} = 0, \quad (17)$$

Рішенням рівняння (17) відносно $V_r(r, z)$ є

$$V_r(r, z) = \frac{F_1(z)}{r} + \frac{2rQ(-r^2 + \text{tg}(\varphi)^2 z^2)}{\pi \text{tg}(\varphi)^4 z^5}. \quad (18)$$

За умови $r = R$ $V_r(r, z) = 0$, тому

$$0 = \frac{F_1(z)}{\text{tg}(\varphi)z}; \quad F_1(z) = 0.$$

Зважаючи на це, маємо підстави записати

$$V_r(r, z) = \frac{2rQ(-r^2 + \operatorname{tg}(\varphi)^2 z^2)}{\pi \operatorname{tg}(\varphi)^4 z^5}. \quad (19)$$

Припускаємо, що вздовж радіуса гранулятора колова швидкість змінюється за квадратичною залежністю, а упродовж його вісі – за лінійною. Припущення про характер зміни колової швидкості спирається на результати досліджень вихрових вісесиметричних потоків [38,41]. Крім того, при $r=0$ та $z=0$ значення $V_j(r, z)$, тобто вільний член загального рівняння другого ступеня дорівнює 0.

Шукаємо розв'язок у вигляді

$$V_\varphi(r, z) = Ar^2 + Bzr + Cr + Fz. \quad (20)$$

Для розв'язання рівняння системи [18] потрібні вирази

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial}{\partial r}(Ar^2 + Bzr + Cr + Fz) &= 2Ar + Bz + C, \\ \frac{\partial^2}{\partial r^2}(Ar^2 + Bzr + Cr + Fz) &= 2A, \\ \frac{\partial^2}{\partial z^2}(Ar^2 + Bzr + Cr + Fz) &= 0. \end{aligned} \right\} \quad (21)$$

Тоді друге рівняння системи диференціальних рівнянь руху вихрового потоку [38] набере вигляду

$$\begin{aligned} & \frac{2rQ(-r^2 + \operatorname{tg}(\varphi)^2 z^2)(2Ar + Bz + C)}{\pi \operatorname{tg}(\varphi)^4 z^5} + \\ & + \left(-\frac{2Qr^2}{\pi \operatorname{tg}(\varphi)^4 z^4} + \frac{2Q}{\pi \operatorname{tg}(\varphi)^2 z^2} \right) \times \\ & \times \left(\frac{8Qr^2}{\pi \operatorname{tg}(\varphi)^4 z^5} - \frac{4Q}{\pi \operatorname{tg}(\varphi)^2 z^3} \right) + \\ & + \frac{2Q(-r^2 + \operatorname{tg}(\varphi)^2 z^2)(Ar^2 + Brz + Cr + Fz)}{\pi \operatorname{tg}(\varphi)^4 z^5} = \\ & = E \left(2F + \frac{2Ar + Bz + C}{r} - \frac{Ar^2 + Brz + Cr + Fz}{r^2} \right) \end{aligned} \quad (22)$$

Значення коефіцієнтів А, В, С і F отримуємо з урахуванням таких граничних умов: на стінці конуса $V_j(r, z) = 0$; на половині радіуса завихрювача $V_\varphi = V_{\varphi 1}$; у центрі конуса $V_j(r, z) = 0$.

Значення $V_{\varphi 1}$ попередньо можна визначити, виходячи з відомої об'ємної витрати газу

$$V_{\varphi 1} = \frac{Q}{S}, \quad (23)$$

де S – площа вільного перерізу газорозподільного пристрою. Рішення системи (22) дає уточнене значення $V_{\varphi 1}$.

Таким чином, отримуємо систему рівнянь

$$\begin{aligned} & \{0 = Fz; \quad 0 = Atg(\varphi)^2 z^2 + Bz^2 tg(\varphi) + Ctg(\varphi)z + Fz; \\ & V_{f1} = \frac{1}{4} Az_1^2 tg(\varphi)^2 + \frac{1}{2} Bz_1^2 tg(\varphi) + \frac{1}{2} Cz_1 tg(\varphi) + Fz_1; \\ & \frac{2rQ(-r^2 + tg(\varphi)^2 z^2)(2Ar + Bz + C)}{\pi tg(\varphi)^4 z^5} + \left(-\frac{2Qr^2}{\pi tg(\varphi)^4 z^4} + \frac{2Q}{\pi tg(\varphi)^2 z^2} \right) \times \\ & \times \left(\frac{8Qr^2}{\pi tg(\varphi)^4 z^5} - \frac{4Q}{\pi tg(\varphi)^2 z^3} \right) + \frac{2Q(-r^2 + tg(\varphi)^2 z^2)(Ar^2 + Brz + Cr + Fz)}{\pi tg(\varphi)^4 z^5} = \\ & = E \left(2F + \frac{2Ar + Bz + C}{r} - \frac{Ar^2 + Brz + Cr + Fz}{r^2} \right) \} \end{aligned} \quad (24)$$

Розв'язання системи (24) щодо А, В, С і F має вигляд

$$\begin{aligned}
& \{A = -\left(8(2r^4 - 3tg(\varphi)^2 z^2 r^2 + tg(\varphi)^4 z^4)Q^2\right) / \left(\left(-6r^2 Q tg(\varphi)^2 z^2 + 6r^4 Q - \right. \right. \\
& \quad \left. \left. -4r^3 Q tg(\varphi) z + 4r Q tg(\varphi)^3 z^3 + 3E\pi tg(\varphi)^4 z^5\right) \pi tg(\varphi)^4 z^4\right); \\
& B = -\left(2\left(-6\pi tg(\varphi)^4 z^6 V_{f1} r^2 Q + 6\pi tg(\varphi)^2 z^4 V_{f1} r^4 Q - 4\pi tg(\varphi)^3 z^5 V_{f1} r^3 Q + \right. \right. \\
& \quad \left. \left. + 4\pi tg(\varphi)^5 z^7 V_{f1} r Q - 6Q^2 r^2 tg(\varphi)^2 z^2 z_1^2 + 12Q^2 r^2 tg(\varphi)^2 z^3 z_1 + \right. \right. \\
& \quad \left. \left. + 3\pi^2 tg(\varphi)^6 z^9 V_{f1} E + 2Q^2 tg(\varphi)^4 z^4 z_1^2 - 4Q^2 tg(\varphi)^4 z^5 z_1 - 8zQ^2 r^4 z_1 + 4Q^2 r^4 z_1^2\right)\right) / \\
& \quad \left(z_1 z^4 \pi tg(\varphi)^3 \left(6r^2 Q tg(\varphi)^2 z^2 z_1 - 6r^2 Q tg(\varphi)^2 z^3 - 6r^4 Q z_1 + 6r^4 Q z + \right. \right. \\
& \quad \left. \left. + 4r^3 Q tg(\varphi) z z_1 - 4r^3 Q tg(\varphi) z^2 - 4r Q tg(\varphi)^3 z^3 z_1 + 4r Q tg(\varphi)^3 z^4 - \right. \right. \\
& \quad \left. \left. - 3E\pi tg(\varphi)^4 z^5 z_1 + 3E\pi tg(\varphi)^4 z^6\right)\right); \quad C = \left(2\left(-6\pi tg(\varphi)^4 z^6 V_{f1} r^2 Q + \right. \right. \\
& \quad \left. \left. + 6\pi tg(\varphi)^2 z^4 V_{f1} r^4 Q - 4\pi tg(\varphi)^3 z^5 V_{f1} r^3 Q + 4\pi tg(\varphi)^5 z^7 V_{f1} r Q + \right. \right. \\
& \quad \left. \left. + 3\pi^2 tg(\varphi)^6 z^9 V_{f1} E - 2Q^2 tg(\varphi)^4 z^4 z_1^2 - 4Q^2 r^4 z_1^2 + 6Q^2 r^2 tg(\varphi)^2 z^2 z_1^2\right)\right) / \\
& \quad \left(\pi tg(\varphi)^3 z^3 \left(6r^2 Q tg(\varphi)^2 z^2 z_1 - 6r^2 Q tg(\varphi)^2 z^3 - 6r^4 Q z_1 + 6r^4 Q z + \right. \right. \\
& \quad \left. \left. + 4r^3 Q tg(\varphi) z z_1 - 4r^3 Q tg(\varphi) z^2 - 4r Q tg(\varphi)^3 z^3 z_1 + 4r Q tg(\varphi)^3 z^4 - \right. \right. \\
& \quad \left. \left. - 3E\pi tg(\varphi)^4 z^5 z_1 + 3E\pi tg(\varphi)^4 z^6\right) z_1\right); \quad F = 0\} \tag{25}
\end{aligned}$$

Розв'язання системи (25) дає шукані значення коефіцієнтів А, В, С і F, після підстановки яких за формулою (20) визначається колова швидкість

$$V_{\varphi}(r, z) = f(r, z, \varphi, Q, V_{\varphi 1}).$$

$$\begin{aligned}
V_{\varphi}(r, z) = & -\left(8(2r^4 - 3tg(\varphi)^2 z^2 r^2 + tg(\varphi)^4 z^4)Q^2 r^2\right) / \left(\left(-6r^2 Q tg(\varphi)^2 z^2 + 6r^4 Q - \right. \right. \\
& \quad \left. \left. -4r^3 Q tg(\varphi) z + 4r Q tg(\varphi)^3 z^3 + 3E\pi tg(\varphi)^4 z^5\right) \pi tg(\varphi)^4 z^4\right) - \\
& -\left(2\left(-6\pi tg(\varphi)^4 z^6 V_{f1} r^2 Q + 6\pi tg(\varphi)^2 z^4 V_{f1} r^4 Q - 4\pi tg(\varphi)^3 z^5 V_{f1} r^3 Q + \right. \right. \\
& \quad \left. \left. + 4\pi tg(\varphi)^5 z^7 V_{f1} r Q - 6Q^2 r^2 tg(\varphi)^2 z^2 z_1^2 + 12Q^2 r^2 tg(\varphi)^2 z^3 z_1 + \right. \right. \\
& \quad \left. \left. + 3\pi^2 tg(\varphi)^6 z^9 V_{f1} E + 2Q^2 tg(\varphi)^4 z^4 z_1^2 - 4Q^2 tg(\varphi)^4 z^5 z_1 - 8zQ^2 r^4 z_1 + \right. \right. \\
& \quad \left. \left. + 4Q^2 r^4 z_1^2\right) r\right) / \left(z_1 z^3 \pi tg(\varphi)^3 \left(6r^2 Q tg(\varphi)^2 z^2 z_1 - 6r^2 Q tg(\varphi)^2 z^3 - \right. \right. \\
& \quad \left. \left. - 6r^4 Q z_1 + 6r^4 Q z + 4r^3 Q tg(\varphi) z z_1 - 4r^3 Q tg(\varphi) z^2 - 4r Q tg(\varphi)^3 z^3 z_1 + \right. \right. \\
& \quad \left. \left. + 4r Q tg(\varphi)^3 z^4 - 3E\pi tg(\varphi)^4 z^5 z_1 + 3E\pi tg(\varphi)^4 z^6\right)\right) + \\
& + \left(2\left(-6\pi tg(\varphi)^4 z^6 V_{f1} r^2 Q + 6\pi tg(\varphi)^2 z^4 V_{f1} r^4 Q - 4\pi tg(\varphi)^3 z^5 V_{f1} r^3 Q + \right. \right. \\
& \quad \left. \left. + 4\pi tg(\varphi)^5 z^7 V_{f1} r Q + 3\pi^2 tg(\varphi)^6 z^9 V_{f1} E - 2Q^2 tg(\varphi)^4 z^4 z_1^2 - 4Q^2 r^4 z_1^2 + \right. \right. \\
& \quad \left. \left. + 6Q^2 r^2 tg(\varphi)^2 z^2 z_1^2\right) r\right) / \left(\pi tg(\varphi)^3 z^3 \left(6r^2 Q tg(\varphi)^2 z^2 z_1 - 6r^2 Q tg(\varphi)^2 z^3 - \right. \right. \\
& \quad \left. \left. - 6r^4 Q z_1 + 6r^4 Q z + 4r^3 Q tg(\varphi) z z_1 - 4r^3 Q tg(\varphi) z^2 - 4r Q tg(\varphi)^3 z^3 z_1 + \right. \right. \\
& \quad \left. \left. + 4r Q tg(\varphi)^3 z^4 - 3E\pi tg(\varphi)^4 z^5 z_1 + 3E\pi tg(\varphi)^4 z^6\right) z_1\right) \tag{26}
\end{aligned}$$

Для визначення величини $P(r, z)$ запишемо перше рівняння системи [38] з урахуванням отриманих вище величин складових швидкості руху газового потоку

$$-\frac{8r^2Q^2(-r^2 + \operatorname{tg}(\varphi)^2 z^2)}{\pi^2 \operatorname{tg}(\varphi)^8 z^9} + \left(-\frac{2Qr^2}{\pi \operatorname{tg}(\varphi)^4 z^4} + \frac{2Q}{\pi \operatorname{tg}(\varphi)^2 z^2} \right) \left(\frac{8Qr^2}{\pi \operatorname{tg}(\varphi)^4 z^5} - \frac{4Q}{\pi \operatorname{tg}(\varphi)^2 z^3} \right) = -\frac{\partial P(r, z)}{\partial z} + E \left(-\frac{8Q}{\pi \operatorname{tg}(\varphi)^4 z^4} - \frac{40Qr^2}{\pi \operatorname{tg}(\varphi)^4 z^6} + \frac{12Q}{\pi \operatorname{tg}(\varphi)^2 z^4} \right) \quad (27)$$

Рішення (27) відносно $P(r, z)$ дає

$$P(r, z) = \int \frac{1}{\pi^2 \operatorname{tg}(\varphi)^8 z^9} (4Q\rho(2r^2Q - 4r^2Q \operatorname{tg}(\varphi)^2 z^2 + 2Q \operatorname{tg}(\varphi)^4 z^4 - 2E\pi \operatorname{tg}(\varphi)^4 z^5 - 10Er^2 \pi \operatorname{tg}(\varphi)^4 z^3 + 3E\pi \operatorname{tg}(\varphi)^6 z^5)) dz + F_2(r) \quad (28)$$

Після інтегрування отримаємо

$$P(r, z) = \frac{1}{\pi^2 \operatorname{tg}(\varphi)^8} \left(4Q\rho \left(\frac{2r^2 E \operatorname{tg}(\varphi)^4 \pi}{z^5} - \frac{1}{2} \frac{\operatorname{tg}(\varphi)^4 Q}{z^4} - \frac{1}{3} \frac{E\pi \operatorname{tg}(\varphi)^4 (-2 + 3 \operatorname{tg}(\varphi)^2)}{z^3} - \frac{1}{4} \frac{r^4 Q}{z^8} + \frac{2}{3} \frac{r^2 \operatorname{tg}(\varphi)^2 Q}{z^6} \right) \right) + F_2(r) \quad (29)$$

Прийнявши, що поточна висота робочого простору вихрового гранулятора $z = z_1$ (нижній переріз робочого простору вихрового гранулятора і значення на цій висоті $P(r, z_1) = P_1$

$$P_1 = -\frac{1}{3} \frac{1}{\pi^2 \operatorname{tg}(\varphi)^8 z_1^8} (3r^4 Q^2 \rho - 24EQr^2 \pi \operatorname{tg}(\varphi)^4 z_1^3 \rho + 6Q^2 \operatorname{tg}(\varphi)^4 z_1^4 \rho - 8Q^2 r^2 \operatorname{tg}(\varphi)^2 z_1^2 \rho - 8EQ\pi \operatorname{tg}(\varphi)^4 z_1^5 \rho + 12EQ\pi \operatorname{tg}(\varphi)^6 z_1^5 \rho - 3F_2(r) \pi^2 \operatorname{tg}(\varphi)^8 z_1^8) \quad (30)$$

Значення $F_2(r)$ одержуємо, виразивши його з (28)

$$F_2(r) = -\frac{1}{3} \frac{1}{\pi^2 \operatorname{tg}(\varphi)^8 z_1^8} (-3P_1 \pi^2 \operatorname{tg}(\varphi)^8 z_1^8 - 3r^4 Q^2 \rho + 24EQr^2 \pi \operatorname{tg}(\varphi)^4 z_1^3 \rho - 6Q^2 \operatorname{tg}(\varphi)^4 z_1^4 \rho + 8Q^2 r^2 \operatorname{tg}(\varphi)^2 z_1^2 \rho + 8EQ\pi \operatorname{tg}(\varphi)^4 z_1^5 \rho - 12EQ\pi \operatorname{tg}(\varphi)^6 z_1^5 \rho). \quad (31)$$

Таким чином остаточно маємо наступний вираз для обчислення $P(r, z)$

$$\begin{aligned}
P(r, z) = & -\frac{1}{3} \frac{1}{z_1^8 \pi^2 \operatorname{tg}(\varphi)^8 z^8} \left(-3Q^2 \rho r^4 z_1^8 + 24Q\rho E r^2 \pi \operatorname{tg}(\varphi)^4 z^3 z_1^8 - 6Q^2 \rho \operatorname{tg}(\varphi)^4 z^4 z_1^8 + \right. \\
& + 8Q^2 \rho r^2 \operatorname{tg}(\varphi)^2 z^2 z_1^8 + 8Q\rho E \pi \operatorname{tg}(\varphi)^4 z^5 z_1^8 - 12Q\rho E \pi \operatorname{tg}(\varphi)^6 z^5 z_1^8 + 3z^8 P_1 \pi^2 \operatorname{tg}(\varphi)^8 z_1^8 + \\
& + 3z^8 Q^2 \rho r^4 - 24z^8 Q\rho E r^2 \pi \operatorname{tg}(\varphi)^4 z_1^3 + 6z^8 Q^2 \rho \operatorname{tg}(\varphi)^4 z_1^4 - 8z^8 Q^2 \rho r^2 \operatorname{tg}(\varphi)^2 z_1^2 - \\
& \left. - 8z^8 Q\rho E \pi \operatorname{tg}(\varphi)^4 z_1^5 + 12z^8 Q\rho E \pi \operatorname{tg}(\varphi)^6 z_1^5 \right) \quad (32)
\end{aligned}$$

Визначимо втрати повної енергії закрученого газового потоку внаслідок зниження інтенсивності його крутки за висотою та зменшення його динамічної складової:

$$\Delta p = P_1^n - P_2^n, \quad (33)$$

де P_{n1}, P_{n2} - повна енергія газового потоку на відповідних висотах робочого простору вихрового гранулятора (нижній переріз робочого простору на висоті z_1 та поточний переріз робочого простору на висоті z_2) (рис. 40).

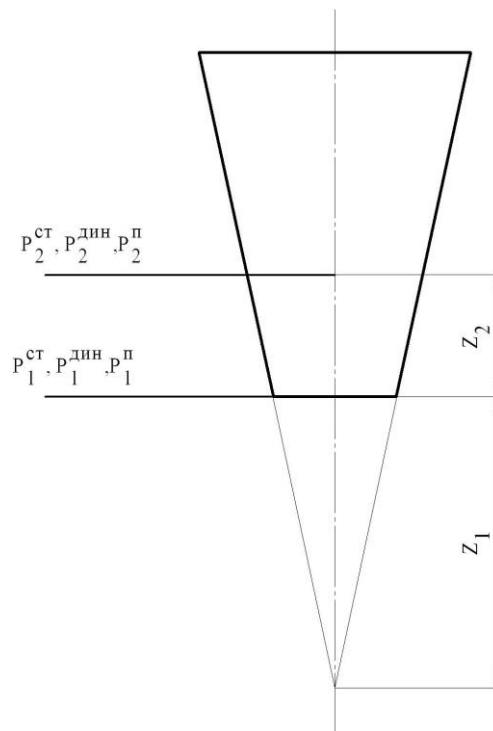


Рис. 40. До втрат повної енергії закрученого газового потоку

$$P^n = P^{ст} + P^{дин}. \quad (34)$$

Статична (потенціальна) складова повної енергії закрученого газового потоку:

- нижній переріз робочого простору на висоті z_1

$$P_1^{cm} = P_1, \quad (35)$$

де P_1 визначається за формулою (30).

- поточний переріз робочого простору на висоті z_2

$$P_2^{cm} = P, \quad (36)$$

де P_2 визначається за формулою (32).

Динамічна складова повної енергії закрученого газового потоку

$$P_{дин} = \rho V^2 / 2, \quad (37)$$

де V - сумарна швидкість руху газового потоку у відповідному перерізі робочого простору вихрового гранулятора

$$V = \sqrt{v_\varphi^2(r, z) + v_z^2(r, z) + v_r^2(r, z)}. \quad (38)$$

Рішення рівнянь математичної моделі дозволило отримати основні графічні залежності гідродинамічних характеристик газового потоку в малогабаритному вихровому конічному апараті з змінним за висотою перерізом робочого простору, які демонструють вплив геометрії робочого простору і технологічних показників на поля швидкостей суцільної фази.

Максимальна витратна складова швидкості $v_z(z)$ газового потоку залишається незмінною в поточному перерізі вихрового гранулятора та монотонно зменшується по мірі збільшення висоти робочої камери (рис. 41, 42), що пояснюється законом зміни величини її перерізу у відповідності до знаменника рівняння (16).

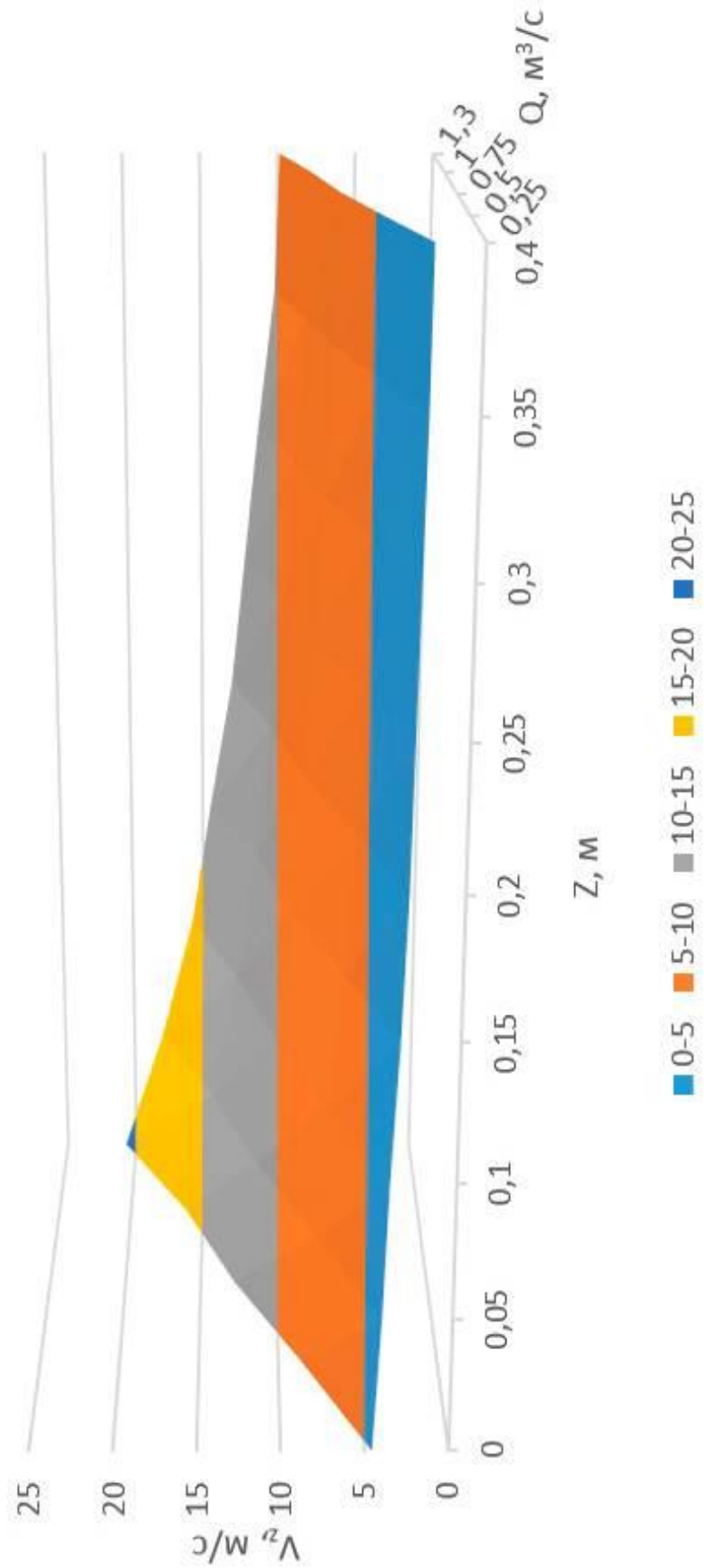


Рис. 41. Характер зміни максимальної витратної швидкості газового потоку (V_{max}) за висотою пристрою залежно від витрати газового потоку (при $\phi=13^\circ$)

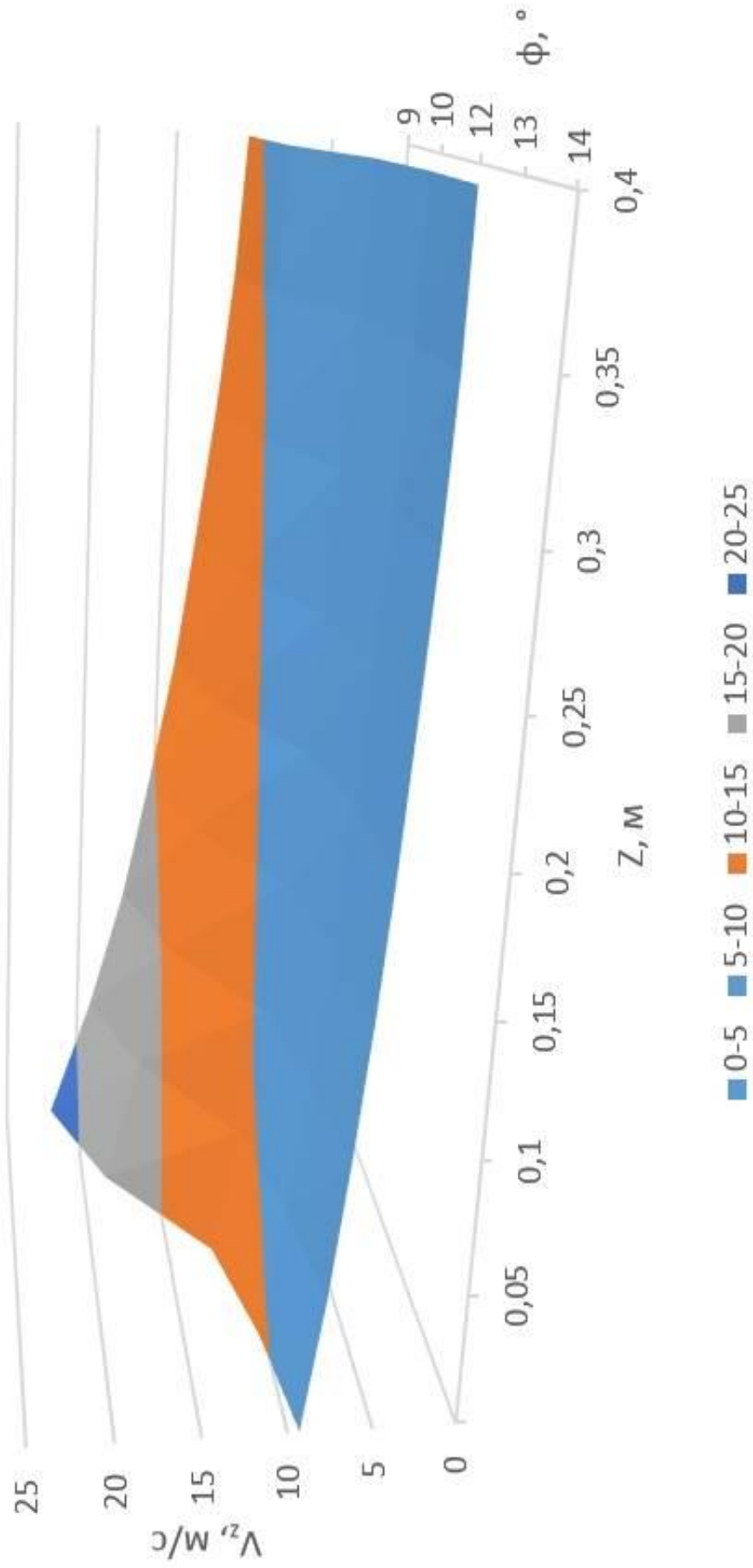


Рис. 42. Характер зміни максимальної витратної швидкості газового потоку \vec{v} за висотою пристрою залежно від кута розкриття конуса робочого простору вихрового гранулятора (при $Q=0,75 \text{ м}^3/\text{с}$)

Зміна витратної складової швидкості $V_z(r)$ газового потоку за висотою пристрою та радіусом представлена на рис. 43.

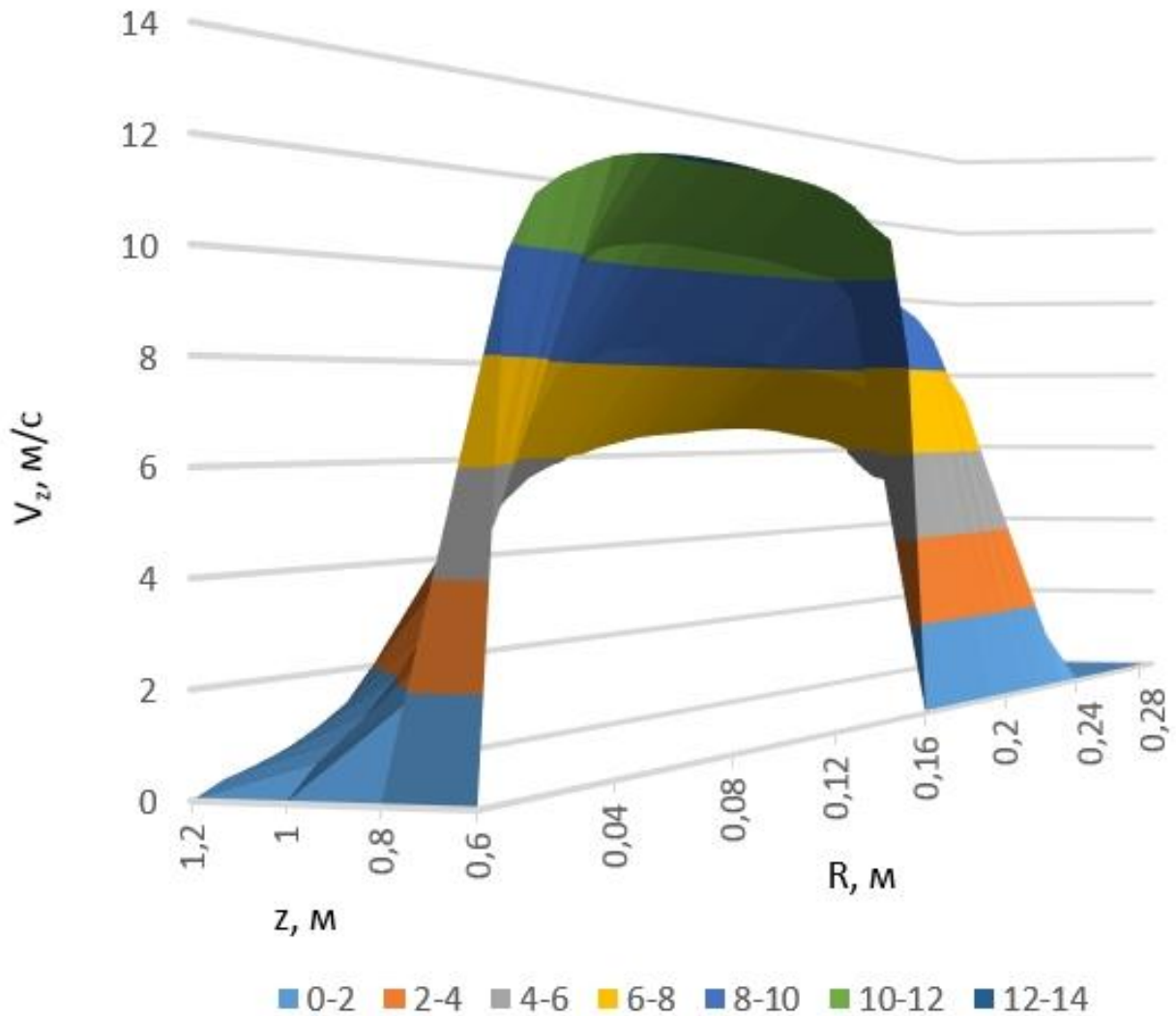
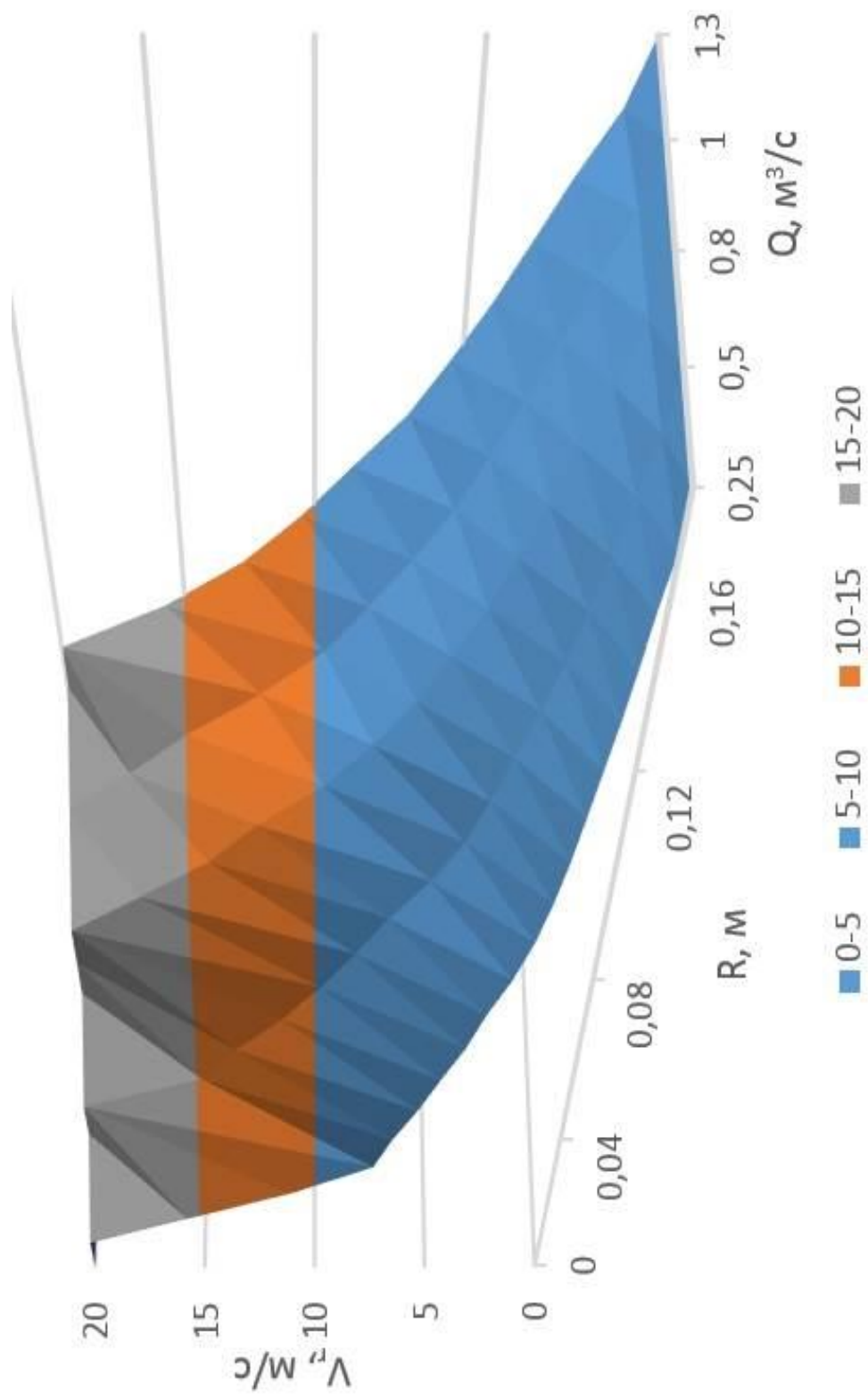


Рис. 43. Характер зміни витратної швидкості газового потоку по висоті залежно від кута розкриття конуса робочого простору вихрового гранулятора (при $\varphi=13^\circ$, $Q=0,75 \text{ м}^3/\text{с}$)

Зменшення радіальної складової швидкості газового потоку за радіусом пристрою відбувається по мірі наближення до максимального радіуса робочого простору апарата на заданій висоті (рис. 44, 45).



Рис

$\varphi=13^\circ$, $z=0,85$ м)

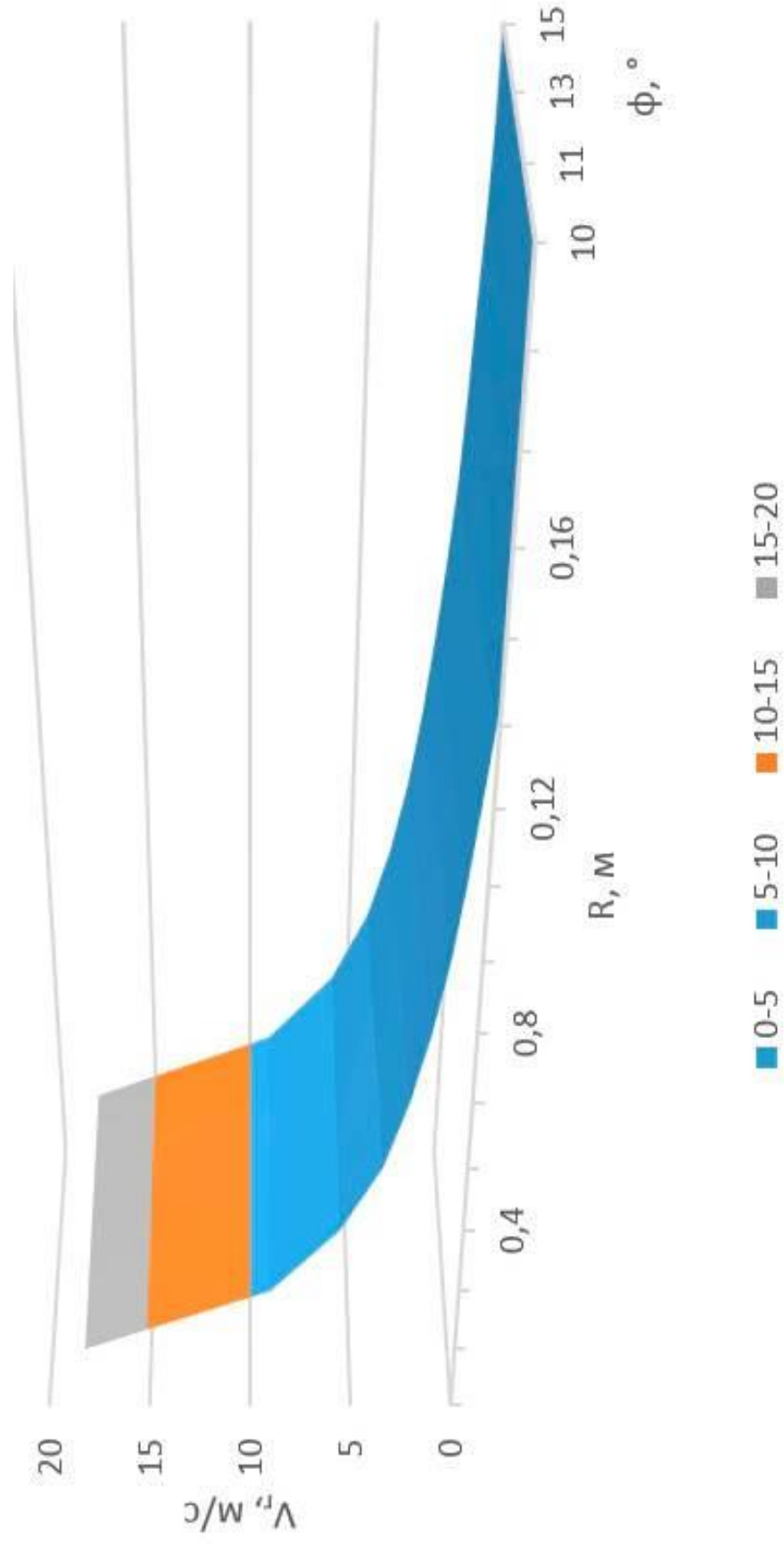
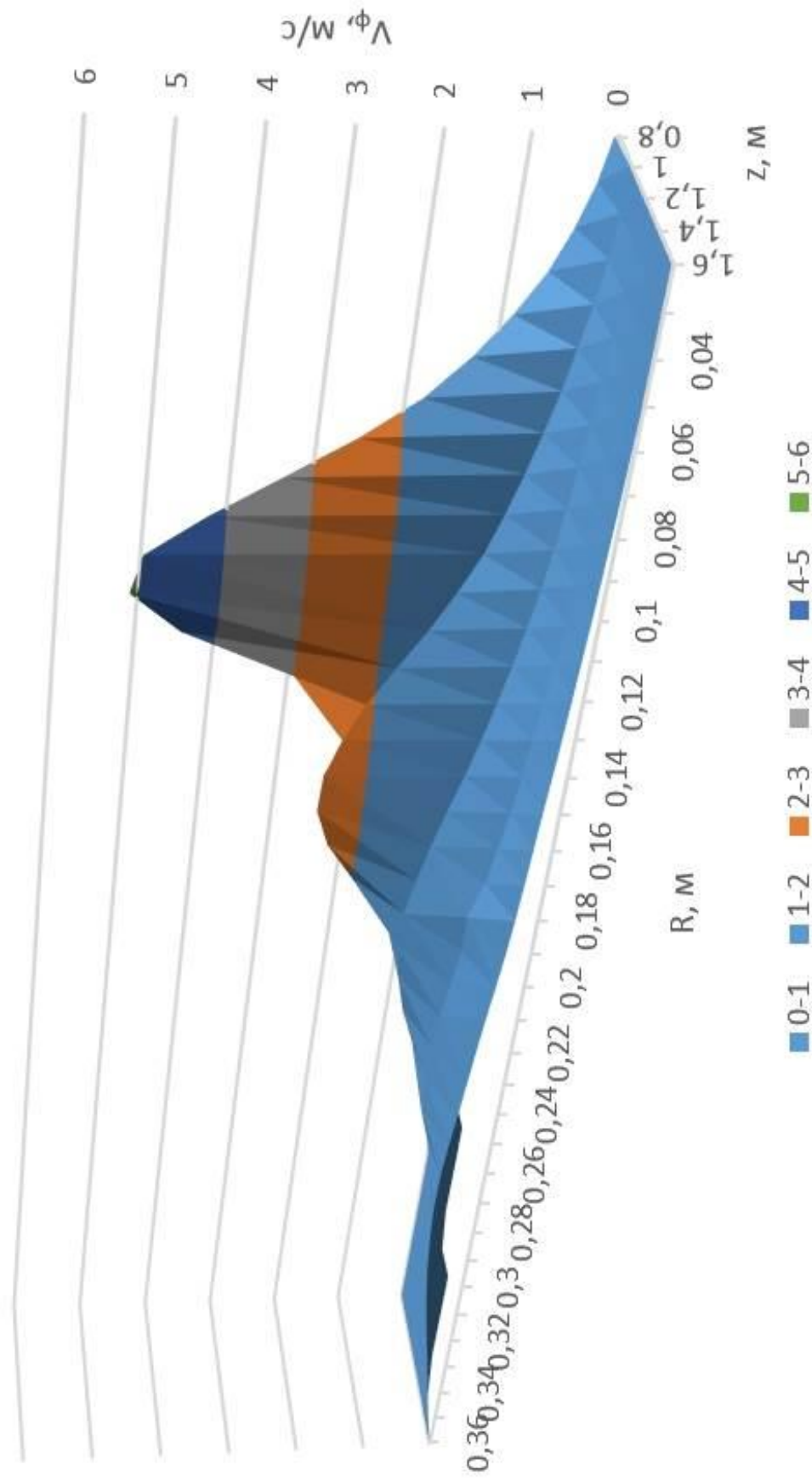


Рис. 45. Характер зміни радіальної швидкості газового потоку залежно від кута розкриття конуса (при $Q=0,75 \text{ м}^3/\text{с}$, $z=0,85 \text{ м}$)



вихрового гранулятора (при $\phi=13^\circ$, $Q=0,75 \text{ m}^3/\text{s}$) на різних висотах пристрою

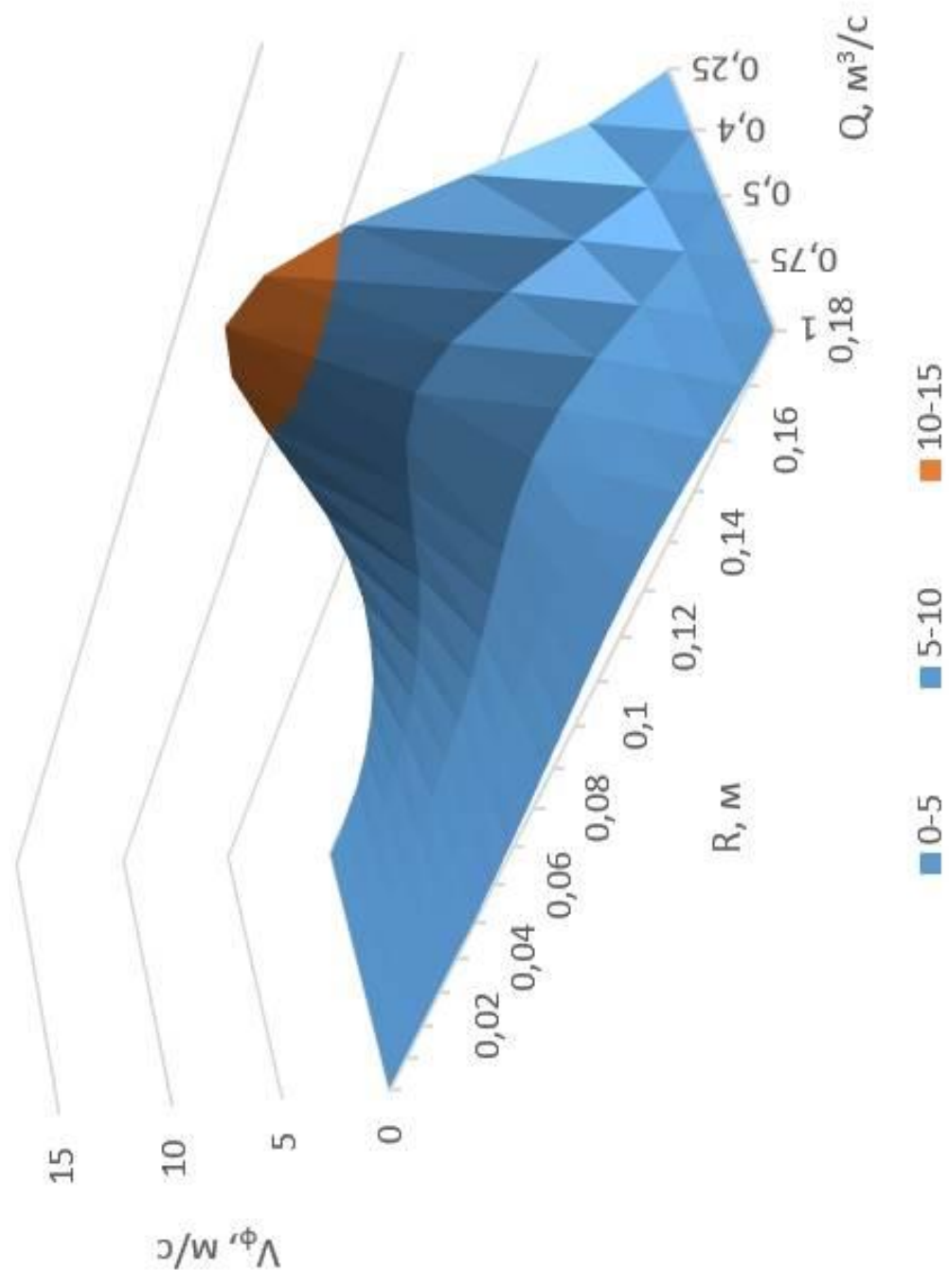


Рис. 1. Зависимость скорости потока (при $\varphi=1$) от радиуса R и расхода Q .

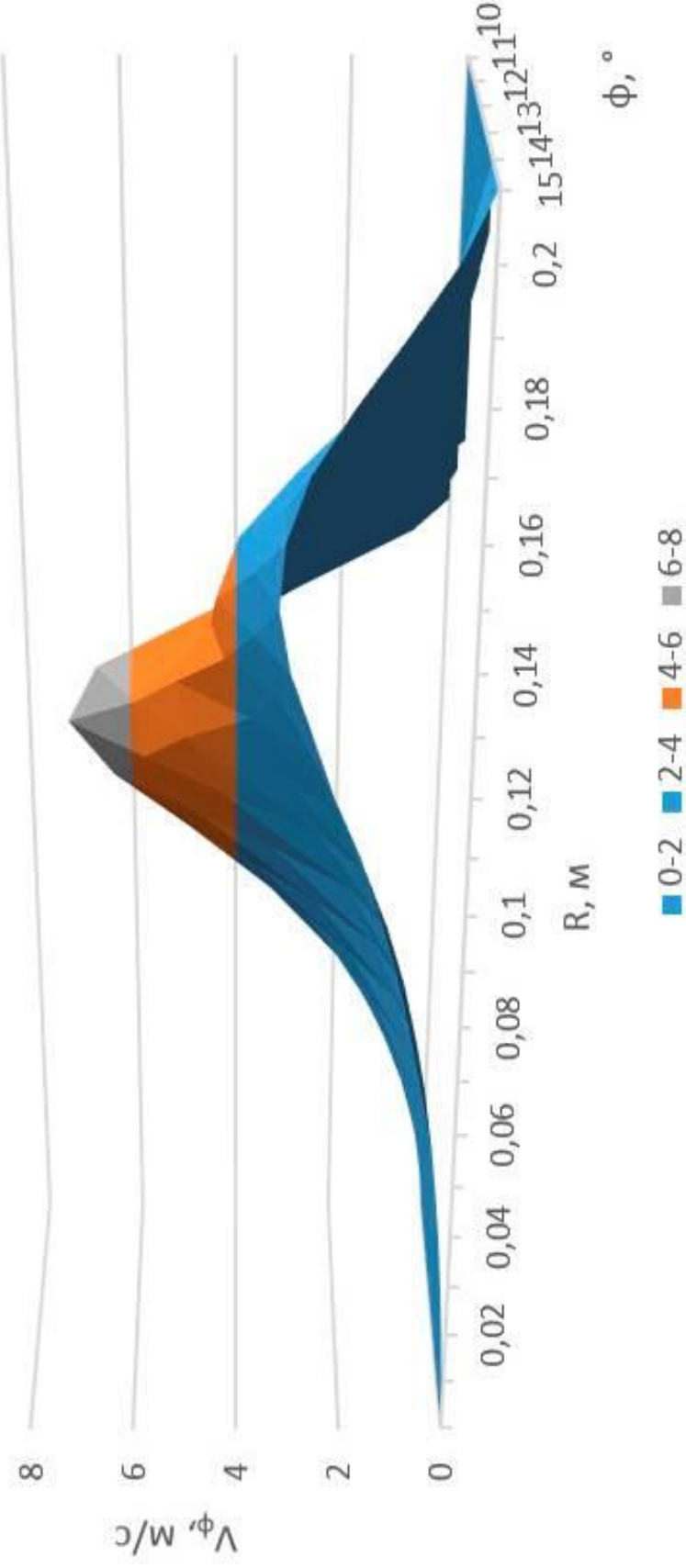


Рис. 48. Характер зміни колової швидкості газового потоку залежно від кута розкриття конуса (при $Q=0,75$ м³/с, $z=0,85$ м)

Колова складова швидкості газового потоку за радіусом пристрою має екстремум (максимум) з поступовим зменшенням значення максимуму у міру наближення до верхнього перерізу робочого простору апарата (рис. 46-48).

Аналіз графічних залежностей демонструє зменшення зони зростання колової складової швидкості газового потоку при збільшенні його витрати та звуження діапазону максимальної швидкості. При цьому пік швидкості залишається постійним за геометричним місцем у робочому просторі вихрового гранулятора.

Значення колової швидкості зі збільшенням витрати газового потоку збільшується швидше. У той самий час, при збільшенні витрати газового потоку в робочому просторі вихрового гранулятора збільшується зона повільного зростання колової швидкості. Таким чином, вихор зміщується в бік твердої стінки та набуває більшої інтенсивності.

Для витратної та радіальної складових швидкості газового потоку за початкових умов та зміни набору геометричних та технологічних умов не спостерігається такої суттєвої зміни кількісного значення розподілу по радіусу і висоті, як для колової складової швидкості газового потоку.

Співставлення даних теоретичних розрахунків та експериментальних досліджень гідродинаміки руху газового потоку у вихровому грануляторі дає задовільні результати - похибка між теоретичними та експериментальними даними становить до 10 %, що припустимо для розрахунку.

Аналіз рис. 49 дозволяє визначити відмінність в місці розташування зони максимальної колової швидкості, зокрема, її піку. Експериментальні дані по визначенню піка колової складової швидкості руху газового потоку не співпадають з теоретичним розрахунком, теоретичні розрахунки фіксують певне зміщення в бік стінки гранулятора та дещо більше числове значення піку. Співставлення результатів теоретичного розрахунку та експериментальних досліджень для довільно обраних за висотою вихрового гранулятора перерізів

робочого простору і різних значеннях кута розкриття його конусу дозволяє стверджувати доводить, що зона максимального значення колової складової швидкості руху вихрового газового потоку коливається в діапазоні поточного радіуса r в межах $r=0,65-0,75 R$.

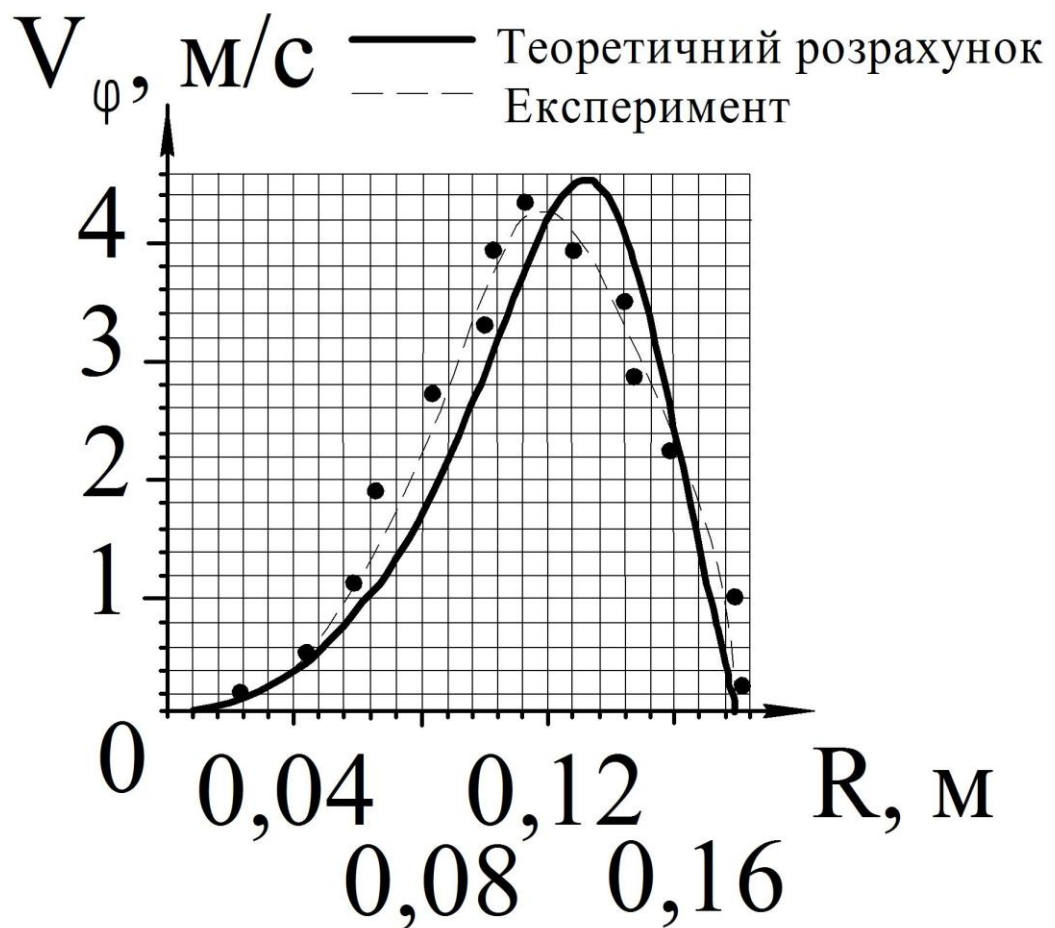


Рис. 49. Співставлення результатів теоретичного розрахунку та експериментальних досліджень колової складової швидкості руху вихрового газового потоку при $Q=0,75 \text{ м}^3/\text{с}$, $\alpha=14^\circ$, $z=0,85 \text{ м}$.

Числові значення розрахункової та експериментально визначеної радіальної складової швидкості руху газового потоку мають достатньо високий ступінь відповідності (рис. 50).

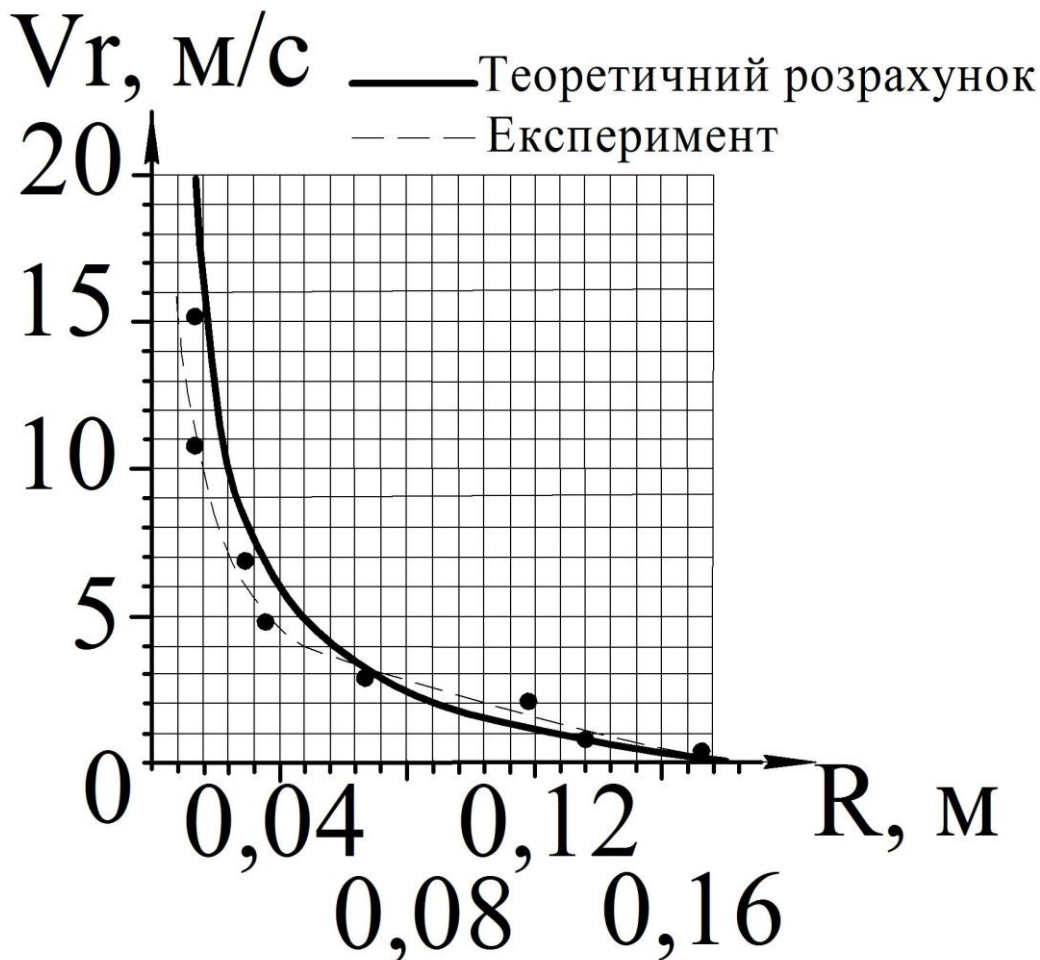


Рис. 50. Співставлення результатів теоретичного розрахунку та експериментальних досліджень радіальної складової швидкості руху вихрового газового потоку при $Q=0,75 \text{ м}^3/\text{с}$, $\alpha=14^\circ$, $z=0,85 \text{ м}$.

Спостерігається взаємне відхилення числового значення експериментальних даних в межах довірчого інтервалу; в цілому графічні зображення епюри радіальної складової повної швидкості газового потоку мають аналогічний закон зміни. На обох епюрах можна спостерігати плавне зниження значення швидкості від вісі гранулятора до його стінки. Результати розрахунку зміни тиску в робочому просторі вихрового гранулятора на різних висотних відмітках та за радіусом на визначеній висоті показані на рис. 51 та 52. Спостерігається поступова зміна тиску в бік збільшення як за висотою, так і за радіусом пристрою. Цей факт пояснює процес зменшення сумарної швидкості руху газового потоку по мірі його руху робочим простором вихрового гранулятора.

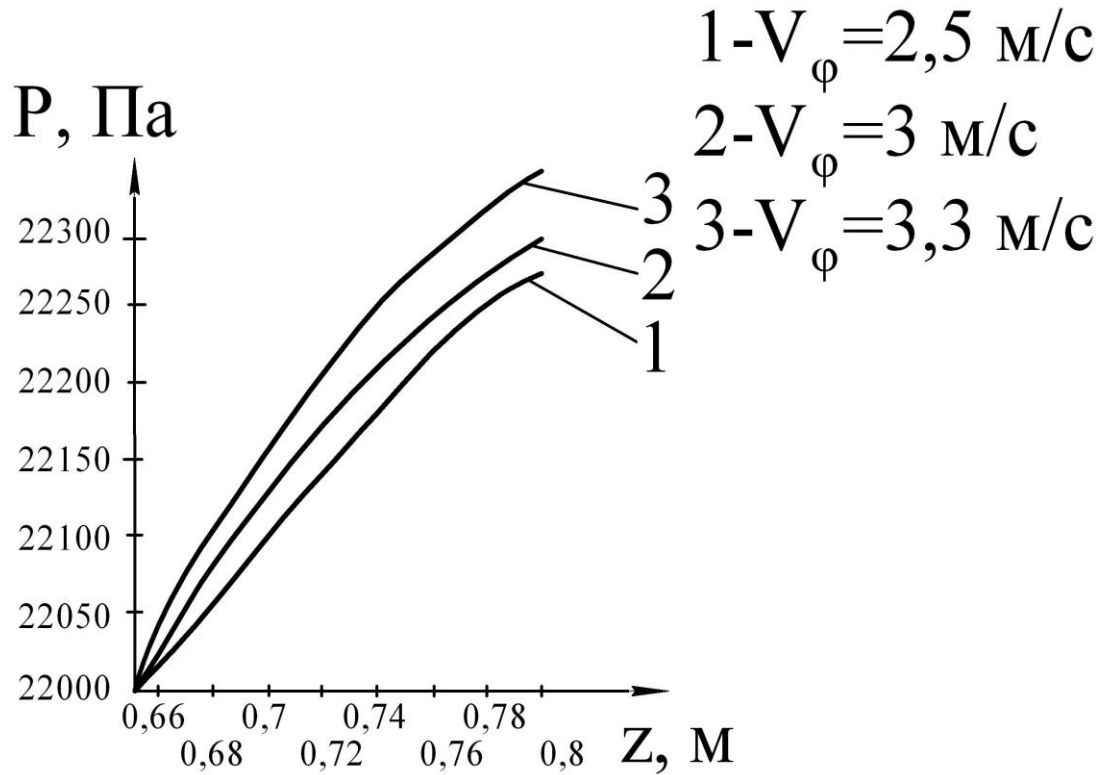


Рис. 51. Зміна тиску газового потоку в робочому просторі вихрового гранулятора за висотою

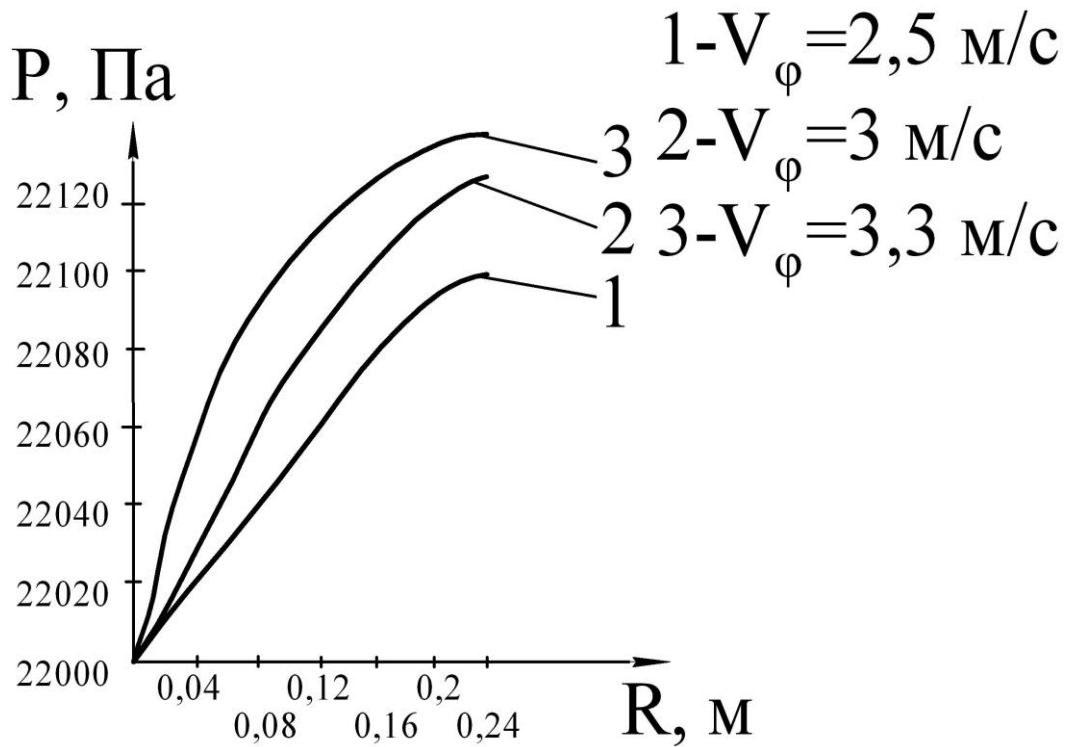


Рис. 52. Зміна тиску газового потоку в робочому просторі вихрового гранулятора за радіусом (висота 1 м)

6.3 Формування структури гранули ПАС

Відповідно до наведених на рис. 35 основних зон руху гранул виділимо функціональні особливості кожної із зон (рис. 53):

I – «активна» зона, де відбувається формування пористої плівки на поверхні гранули рядової аміачної селітри (як зазначено раніше, за допомогою підбору оптимальної конструкції газорозподільного пристрою стає можливим розширення «активної» зони та досягнення рівності між висотою «активної» зони та зони I);

II – зона нанесення розчину на поверхню гранули;

III – сепараційна зона, де відбувається винесення пилу з апарату та дрібних гранул, які в подальшому можуть бути використані в якості внутрішнього ретура.

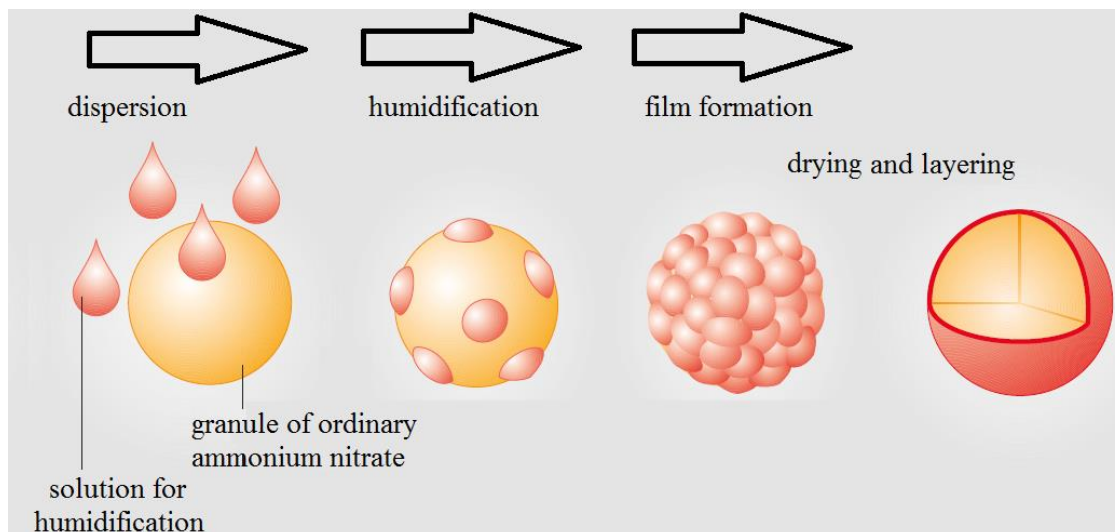


Рис. 53. Процес отримання нанопористого шару на поверхні гранули (авторська модифікація на основі даних [42])

Для визначення оптимальних зон гранулювання у робочому просторі апарату в якості попереднього етапу проведено серію досліджень з підфарбовуванням розчину аміачної селітри на різних етапах нанесення плівки на поверхню гранул. Результати визначення швидкості росту плівки на поверхні гранули ретура представлено на рис. 54.

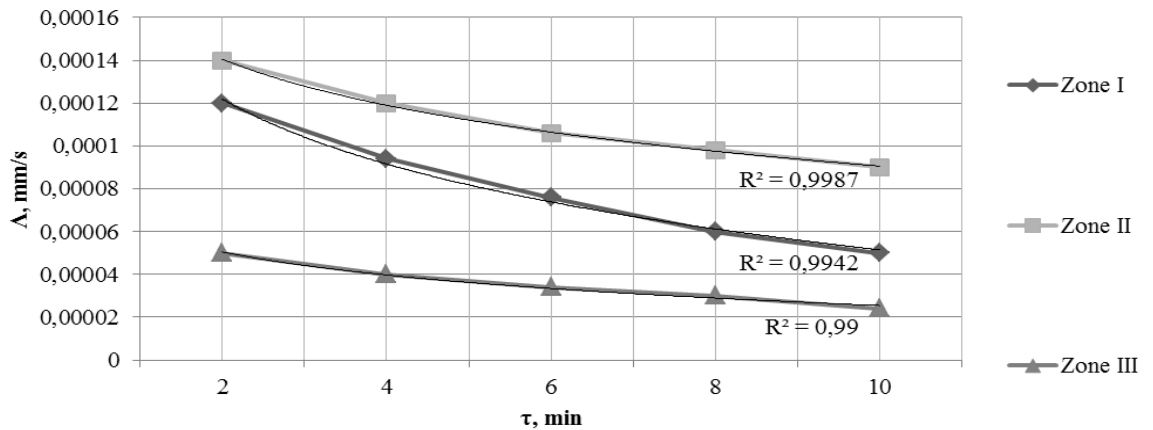


Рис. 54. Швидкість росту плівки на поверхні гранули ретур у відповідних зонах гранулятора (діаметр ретур 2 мм, кількість розчину, який наноситься на ретур, $3,3 \cdot 10^{-3}$ кг/с)

Зважаючи на можливість організації направлено нанесення плівки розчину на гранулу, можливість класифікації гранул за розмірами, а також з урахуванням того, що в процесі нанесення плівки на поверхню рядової аміачної селітри не відбувається агломерація, стирання тощо, вважатимемо, що процес нанесення плівки на гранулу буде відбуватись без вторинних явищ:

$$\frac{dD_{\tau}}{d\tau} \neq 0; \frac{d\rho(D_{\tau})}{d\tau} \neq 0; \frac{dM_l}{d\tau} \neq 0; \frac{dN_l}{d\tau} = 0, \quad (39)$$

де D - діаметр гранули; $\rho(D)$ - густина розподілу частинок за розмірами; M_l - маса шару гранул в апараті; N_l - кількість гранул в шарі.

Аналіз рис. 54 показує, що у зоні III швидкість росту гранул достатньо мала внаслідок того, що дрібні гранули виносяться із шару і вірогідність їх попадання в зону зрошення незначна. В зоні II відбувається монотонне зростання розміру гранули, яке завершується у зоні I. Падіння швидкості росту гранули у зоні I пояснюється втратою рухливості крупних гранул та їх переважним заляганням в зоні біля газорозподільного вузла. В «активній» зоні I відбувається інтенсивне видалення вологи із розчину.

Таким чином, безпосередньо в процесі формування пористої плівки на поверхні гранул будуть приймати дві зони гранулятора.

Введення ретура у робочий простір гранулятора відбувається у зону II; туди ж ежектуючим потоком подається і внутрішній ретур. Нанесення плівки розчину, завдяки можливості організації процесу пневмокласифікації в робочому просторі гранулятора, організовується (після розрахунку процесу класифікації, виходячи з фракційного складу рядової аміачної селітри, яка подається в апарат) на межі переходу з зони II до зони III. Інтенсивність вихрового потоку у цій зоні зменшується і розпилення рідкого матеріалу можна організувати направленим потоком назустріч вихровому потоку гранул. На цій висоті апарата встановлюється пристрій для розпилення рідкого матеріалу. Кількість пристроїв визначається продуктивністю апарату та необхідною товщиною плівки. Дані досліджень [43] показують, що для формування пористої аміачної селітри із структурою, яка забезпечить нормативні показники поглинальної та стримуваної здатностей, оптимальна товщина плівки коливається в межах 0,15-0,2 мм.

Як показують дані попередніх досліджень, на кожній висоті вихрового гранулятора у режимі стисненого руху гранул основною фракцією є розрахункова за умовами класифікації. Таким чином, вважатимемо, що нанесення плівки відбувається на гранули визначеної фракції, а гранули іншого розміру поступово покидають розрахункову висоту, переміщуючись вище, або нижче.

Також слід зазначити, що конфігурація зваженого шару не впливає на вид аналітичних залежностей із розрахунку кінетики росту гранул. В такому разі для створення моделі будуть застосовані аналітичні залежності із теорії зваженого шару.

У загальному вигляді рівняння швидкості росту гранул базується на законі нульового порядку

$$\frac{dD}{d\tau} = \frac{G_s}{F_l \cdot \rho_s}, \quad (40)$$

де G_s - кількість розчину для зволоження; F_l - площа поверхні псевдозрідженого шару, на яку наноситься розчин («дзеркало» псевдозрідженого шару); ρ_s - густина розчину для зволоження

Диференціальне рівняння балансу частинок (і одночасно зміни гранулометричного складу) у вихровому псевдозрідженому шарі описується рівнянням [44]

$$\frac{\partial \rho(D, \tau)}{\partial \tau} + \frac{\partial [\Lambda(D, \tau) \rho(D, \tau)]}{\partial D} = k_{load} \rho_o(D, \tau) - k_{unload} \rho(D, \tau), \quad (41)$$

де $\Lambda(D, \tau)$ - швидкість росту гранул, k_{load} - константа завантаження, k_{unload} - константа вивантаження.

При цьому

$$\begin{aligned} \rho(0, \tau) &= 0, \\ \text{at } D \rightarrow \infty \quad \rho(D, \tau) &\rightarrow 0 \end{aligned}$$

$$\rho(D, 0) = \rho_o(D), \quad \rho_o(D) = \sum_{i=1}^n (N_i) / N_l \Delta D, \quad (42)$$

де $\Delta D = D_{max} - D_{min}$ для заданого фракційного складу початкового ретура, що подається у гранулятор при його запуску.

Значення констант визначається наступним чином:

- константа завантаження (для рециклових процесів)

$$k_{load} = \frac{N_{load}}{N_l}, \quad (43)$$

де N_{load} - кількість гранул ретура, які надходять до робочого простору вихрового гранулятора; кількість гранул у вихровому зваженому шарі.

У разі організації внутрішньої циркуляції ретура гранули визначеного розміру, які відводяться із верхнього перерізу корпусу у визначеній кількості, повертаються в робочий простір ежектуючим потоком. В такому разі

$$N_{load} = N_{e.sa} + N_{i.sa}, \quad (44)$$

де $N_{e.sa}$ - кількість гранул зовнішнього ретура, $N_{i.sa}$ - кількість гранул внутрішнього ретура.

- константа вивантаження

$$k_{unload} = \frac{N_{unload}}{N_l}, \quad (45)$$

де N_{unload} - кількість вивантажених гранул

У випадку періодичного режиму роботи вихрового гранулятора (наприклад, при зволоженні гранул рядової аміачної селітри за межами робочого простору) рівняння (41) матиме вигляд

$$\frac{\partial \rho(D, \tau)}{\partial \tau} + \frac{\partial [\Lambda(D, \tau) \rho(D, \tau)]}{\partial D} = 0. \quad (46)$$

Для стаціонарного режиму роботи вихрового гранулятора кількість гранул у вихровому зваженому шарі не змінюється ($\frac{\partial \rho}{\partial \tau} = 0$; $N_l = const$; $N_{заг} = N_{вих}$;

$$V_l = \frac{1}{6} \int_0^{N_l} \pi D^3 \rho(D) dD = const.)$$

Для випадку, коли нанесення плівки розчину відбувається у вихровий зважений шар гранул з вузьким фракційним складом вважатимемо, що швидкість росту діаметру гранули та витрати розчину є лінійною. В такому разі рівняння (42) може бути проінтегровано у квадратурах та отримати вигляд

$$\rho(D) = \frac{k_{load}}{\Lambda} \exp\left(\frac{-k_{unload} D}{\Lambda}\right) \int_0^D \rho_o(D) \exp\left(\frac{k_{unload} D}{\Lambda}\right) dD. \quad (47)$$

Зміна маси вихрового зваженого шару ($\frac{dM_l}{d\tau} \neq 0$), визначення товщини покриття та закону її зміни.

Матеріальний баланс процесу нанесення плівки на гранули ретура подається у вигляді наступного розрахункового алгоритму.

Маса вихрового зваженого шару в початковий час (момент запуску апарата)

$$M_l(\tau = 0) = M_l^{in}. \quad (48)$$

Зміна маси вихрового зваженого шару за проміжок часу τ описується такою залежністю:

$$\frac{dM_l}{d\tau} = G_s - G_h, \quad (49)$$

де G_h - кількість видаленої з розчину вологи.

Для гранул аміачної селітри (у тому числі і пористої структури) припустимим вмістом вологи, який не призведе до процесу злежування гранули, є значення 0,2 % масових. Для забезпечення надійного зберігання гранул без втрати ними властивостей вважатимемо, що вся волога, яка наявна в розчині, випаровується в процесі гранулювання.

Тоді

$$M_l = G_s \cdot x \cdot \tau + M_l^{in}, \quad (50)$$

де x - масова доля твердої частини у розчині.

Зважаючи на прийняту теорію рівномірно-поверхневого росту гранул збільшення маси плівки на поверхні гранули описується таким диференціальним рівнянням:

$$dM_f = (G_s \cdot x) d\tau = G_f d\tau, \quad (51)$$

де dM_f - приріст маси нанесеної плівки, G_f - витрата матеріалу на формування плівки.

Проведемо описання процесу збільшення маси оболонки за момент від початку нанесення розчину до завершення формування плівки. Зміна діаметру гранули у цьому процесі відбувається від значення D_0 ($\tau = 0$) до D . Таким чином

$$M_f = \int_0^{\tau} G_f d\tau = G_f \cdot \tau. \quad (52)$$

Маса плівки за цикл її нанесення на гранулу ретурна

$$M_f = \frac{1}{6} \cdot \rho_f \cdot N_l \cdot \pi \cdot (D^3 - D_0^3), \quad (53)$$

де

$$N_l = \frac{M_{sa}}{m_{sa}}, \quad (54)$$

M_{sa} - кількість ретура залежно від продуктивності апарату, m_{sa} - маса гранули ретура.

З урахуванням (52) та (53) рівняння (54) запишеться у вигляді

$$G_f \cdot \tau = \frac{1}{6} \cdot \rho_f \cdot \frac{M_{sa}}{m_{sa}} \cdot \pi \cdot (D^3 - D_0^3). \quad (55)$$

З рівняння (55)

$$D^3 - D_0^3 = \frac{6 \cdot G_f \cdot \tau \cdot m_{sa}}{\pi \cdot \rho_f \cdot M_{sa}}. \quad (56)$$

Зважаючи на те, що товщина плівки

$$\delta = \frac{1}{2}(D^3 - D_0^3), \quad (57)$$

запишемо (56) у вигляді

$$\delta = 0,62 \sqrt[3]{\frac{G_f \cdot \tau \cdot m_{sa}}{\rho_f \cdot M_{sa}}}, \quad (58)$$

де, задаючись значенням $m_{sa} = 0,52 \frac{D_0^3}{\rho_{sa}}$, можливе визначення початкового

діаметру гранули (діаметру ретура).

Диференціювання рівняння (58) відносно τ дає шукану величину швидкості росту плівки на поверхні гранули ретура

$$\Lambda = \frac{d\delta}{d\tau} = \frac{0,62 \cdot G_f \cdot m_{sa}}{\rho_f \cdot M_{sa} \sqrt[3]{\left(\frac{G_f \cdot \tau \cdot m_{sa}}{\rho_f \cdot M_{sa}}\right)^2}}. \quad (59)$$

Результати теоретичних розрахунків за формулою (59) задовільно відповідають даним експериментальних досліджень (рис. 54). Алгоритм подальшого технологічного розрахунку вихрового гранулятора на базі отриманих залежностей наведено у п'ятому розділі дисертаційної роботи.

Рівняння матеріального балансу у виділеному в елементарному об'ємі гранулятора має вигляд [45] за умови, якщо процес переносу матеріальних потоків розглядати в умовах, які безперервно змінюються у часі та просторі

$$\frac{\partial M_i^i(\tau)}{d\tau} \int_0^D \rho(D) dD = M_i^{i-1}(\tau) \int_0^D \rho(D) dD - M_i^{i+1}(\tau) \cdot \theta \int_0^D \rho(D) dD, \quad (60)$$

де M_i^i , M_i^{i-1} , $M_{\text{ви}}^{i+1}$ - маса гранул у поточному, розташованому вище та розташованому нижче елементарних об'ємах гранулятора; θ - вірогідність переходу гранул з одного елементарного об'єму до іншого.

Із всієї маси гранул в елементарному об'ємі M_i^{i-1} до розташованого нижче елементарного об'єму $M_{\text{ви}}^{i+1}$ перейдуть ті гранули, які матимуть масу, більшу за певну граничну, яка дозволяє утримуватись цим гранулам на визначеній висоті. Зважаючи на те, що певна частина гранул (як показали дані попередніх досліджень) є меншою за розміром (масою), ніж розраховані за умовами класифікації у кінчному робочому просторі, вони будуть або укрупнюватись, або перейдуть в елементарний об'єм M_i^{i-1} .

Гідродинамічні умови переходу гранул до розташованого вище елементарного об'єму визначаються величинами швидкостей руху газового потоку: робочої швидкості руху v_2 та швидкості унесення гранул із вихрового зваженого шару v_3 . Зважаючи на те, що в якості робочої швидкості прийнято швидкість руху газового потоку, при якому спостерігається розвинений вихровий шар (розрахунок швидкості – за даними [18] та підрозділу 3.2), вірогідність переходу гранул до об'єму M_i^{i-1}

$$\theta_l^{i-1} = f\left(\frac{V_2 + \Delta V_{i-1}}{V_3}\right), \quad (613)$$

де $\Delta V_{i-1} < V_3 - V_2$.

Гідродинамічні умови переходу гранул до розташованого нижче елементарного об'єму визначаються за подібним алгоритмом (V_0' - швидкість початку руху гранул, v_0 - швидкість початку псевдозрідження), у результаті чого

$$\theta_l^{i+1} = f\left(\frac{V_0' - \Delta V_{i+1}}{V_0}\right), \quad (62)$$

де $\Delta V_{i+1} < V_0' - V_0$.

Густину розподілу гранул за розмірами можна представити у вигляді [44]

$$\frac{\partial \rho(D)}{\partial \tau} = \text{div}(u\rho(D)) + \frac{\partial(\Lambda\rho(D))}{\partial D} - \frac{\partial \rho(D)}{\partial G_{ab}} \cdot \frac{dG_{ab}}{d\tau}, \quad (63)$$

Аналізуючи доданки рівняння (63), приходимо до висновку, що у випадку, який розглядається, відсутнє конвективне перенесення гранул ($u = 0 = 0$), також їх винесення через дроблення та стирання ($G_{ab} = 0$). Таким чином, у рівнянні (63) для подальшого розрахунку буде використано лише другий доданок у правій частині, тобто

$$\frac{\partial \rho(D)}{\partial \tau} = \frac{\Lambda \partial(\rho(D))}{\partial D}. \quad (64)$$

Залежність для обчислення зміни діаметру гранули у такому разі матиме вигляд

$$D = D_0 + \Lambda \cdot [\ln \rho(D) - \ln \rho_0(D)] \cdot \tau. \quad (65)$$

6.4 Дослідження зразків гранул ПАС

Теоретичні основи зволоження і отримання нанопористого шару, які представлені в попередньому розділі, дозволяють забезпечити рівномірне

нанесення зволожувача і формування плівки на поверхні гранул. Однак, провести теоретичне прогнозування морфології нанопористої поверхні на даному етапі є складним внаслідок відсутності даних про оптимальний режим нанесення покриття. В такому випадку необхідно провести дослідження з вивчення фазового складу і морфології поверхні гранули. Крім того, слід встановити факт наявності або відсутності хімічних реакцій з утворенням нових з'єднань при зволоженні розчинами і обробці гранул в потоці високотемпературного теплоносія. Утворення нових з'єднань є вкрай небажаним. Позитивним ефектом запропонованого в статті способу отримання гранул ПАС може стати збільшення кількості кисню в гранулі після проведення всіх стадій формування нанопористої структури. Результати цих досліджень представлені нижче.

Фазовий склад

Результати дослідження фазового складу рядовий аміачної селітри і всіх зразків ПАС наведені на рис. 55 та 56 (постановка завдання дослідження преставлена у роботах [46-48]).

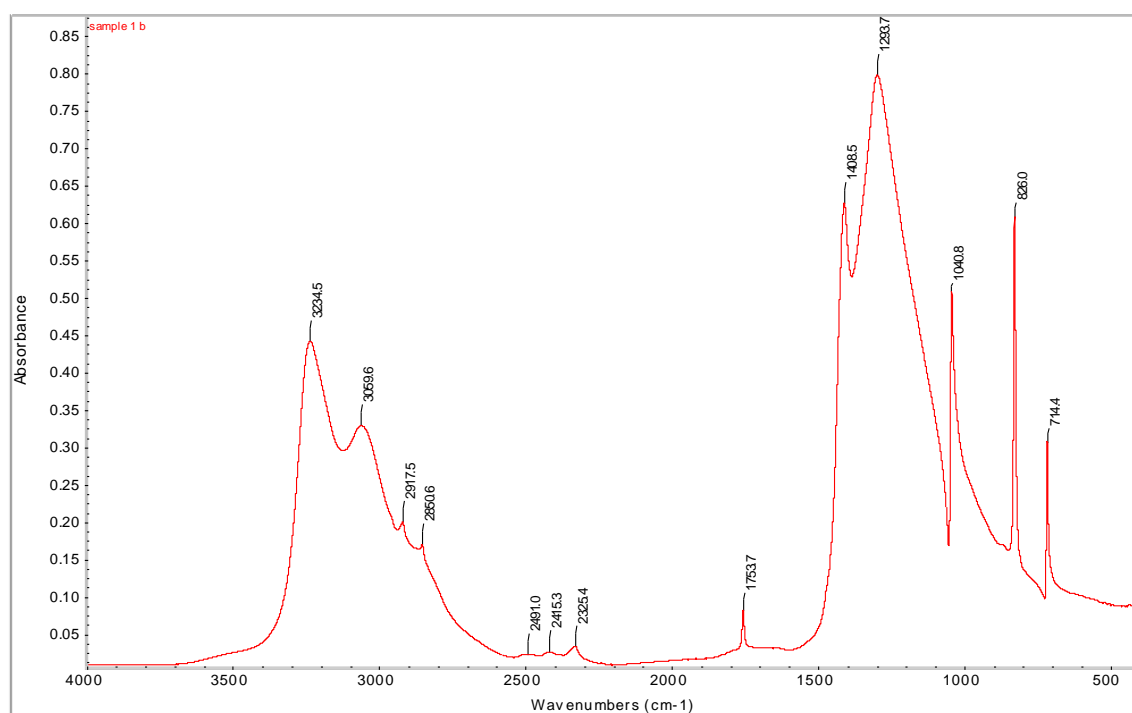


Рис. 55. Результати diamond crystal ATR FTIR spectroscopy рядової аміачної селітри

Як видно з даних diamond crystal ATR FTIR spectroscopy, розташування піків для рядової аміачної селітри і ПАС збігаються. У той же час, спостерігається різна інтенсивність цих піків, а також відхилення на ділянках хвильових чисел 3600-3400 cm^{-1} і 1700-1500 cm^{-1} . Ці відхилення свідчать про наявність залишкової вологи, яка принесена розчинами в обсяг гранули і не видалена при термообробці. Можна зробити висновок про збереження фазового складу аміачна селітри після всіх видів операцій по формуванню нанопористої структури. Підвищена інтенсивність піків також може свідчити про вплив на дані спектроскопії часу термічної обробки гранул.

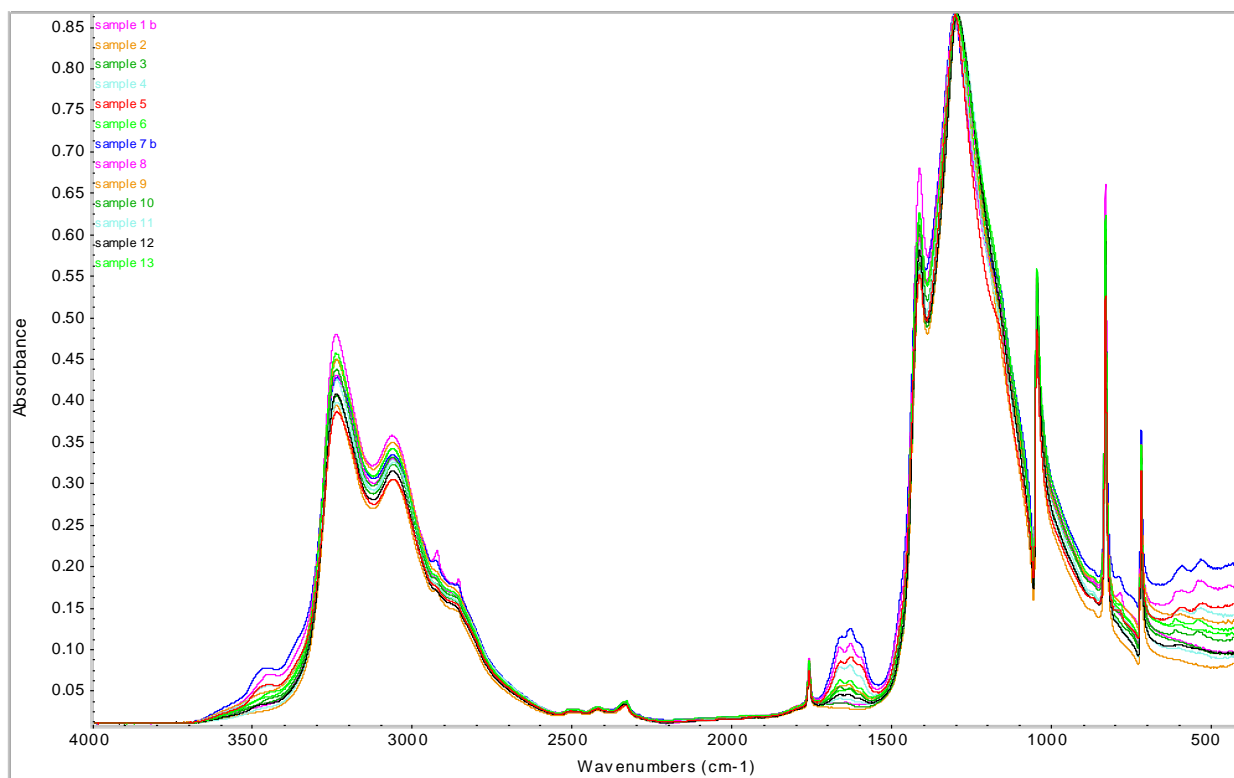


Рис. 56. Результати diamond crystal ATR FTIR spectroscopy зразків ПАС (порівняльна характеристика)

Морфологічні особливості поверхні

Для зручності опис морфології поверхні зразків зведено в таблицю 1.

Таблиця 1. Опис морфології поверхні зразків

Зразок	Опис морфології поверхні
Sample 1b	Поверхня з мережею пор в мікрометровому діапазоні, отриманих при формуванні гранули з розплаву в грануляційній вежі. Пориста поверхня нерівномірна.
Sample 2	Поверхня з мережею пор в мікрометровому діапазоні, отриманих при формуванні гранули з розплаву в грануляційній вежі. Після термообробки утворилося певна кількість звивистих нанопор. Пориста поверхня нерівномірна.
Sample 3	Поверхня з мережею пор в мікрометровому і нанометровому діапазоні. Пори переважно прямолінійні. Пориста поверхня нерівномірна.
Sample 4	Поверхня з невеликою кількістю пор в мікрометровому діапазоні. Після зволоження площа пористої поверхні значно зменшилася.
Sample 5	Поверхня з невеликою кількістю пор в мікрометровому діапазоні. Після зволоження площа пористої поверхні значно зменшилася.
Sample 6	Переважає більшість криволінійних неглибоких нанопор на поверхні. Розвинена і рівномірна по поверхні мережа пор.
Sample 7b	Переважає більшість криволінійних глибоких нанопор на поверхні. Розвинена і рівномірна по поверхні мережа пор.
Sample 8	Зменшення у порівнянні зі зразком 7b глибини нанопор. Розвинена і рівномірна по поверхні мережа пор.
Sample 9	Поверхня з мережею пор в мікрометровому діапазоні, отриманих при формуванні гранули з розплаву в грануляційній вежі. Пориста поверхня нерівномірна. Процес зволоження і термообробки не вплинув на структуру пор.
Sample 10	Поверхня з мережею пор в мікрометровому діапазоні, отриманих при формуванні гранули з розплаву в грануляційній вежі. Пориста поверхня нерівномірна. Процес зволоження і термообробки не вплинув на структуру пор.
Sample 11	Поверхня з мережею пор в мікрометровому діапазоні, отриманих при формуванні гранули з розплаву в грануляційній вежі. Пориста поверхня нерівномірна. Процес зволоження і термообробки не вплинув на структуру пор.
Sample 12	Поверхня з мережею пор в мікрометровому діапазоні, отриманих при формуванні гранули з розплаву в грануляційній вежі. Пориста поверхня нерівномірна. Процес зволоження і термообробки не вплинув на структуру пор.
Sample 13	Поверхня з мережею пор в мікрометровому діапазоні, отриманих при формуванні гранули з розплаву в грануляційній вежі. Пориста поверхня нерівномірна. Процес зволоження і термообробки не вплинув на структуру пор.

Результати електронної мікроскопії з вивчення морфології зразків аміачної селітри представлені на рис. 57. Для зменшення кількості ілюстративного матеріалу на вказаному рисунку представлені тільки ті зразки, які отримані різними способами. При цьому в разі зволоження гранули водним розчином тієї чи іншої речовини були обрані зразки, які характеризуються рівномірною по поверхні і розвиненою мережею криволінійних глибоких нанопор. Такими зразками для подальшого порівняння показників якості (за попередніми даними відбору з таблиці 2) прийняті зразки № 1b, 2, 3, 6, 7b, 8.

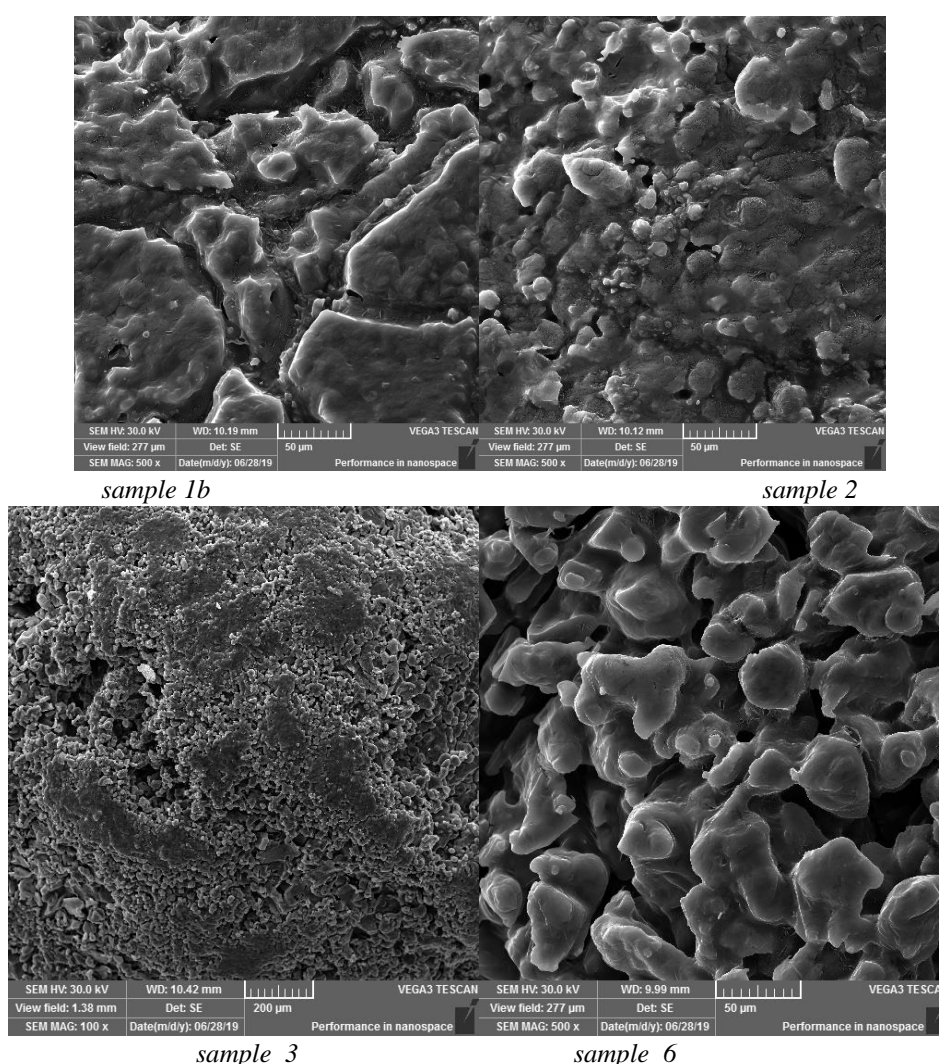


Рис. 57. Морфологічні особливості структури поверхні гранул

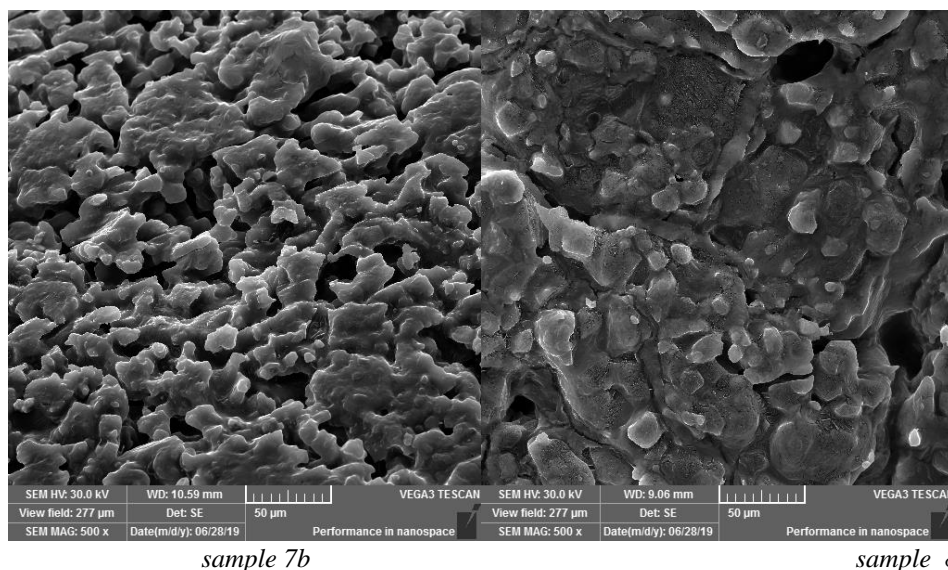


Рис. 57. Морфологічні особливості структури поверхні гранул (продовження)

Для представлених на рис. 57 зразків в таблиці 2 наведені детальні показники якості.

Таблиця 2. Показники якості гранул аміачної селітри

Зразок	Міцність, кг/гранулу	Поглиняльна здатність, %	Утримувальна здатність, %	Відносна поверхня пористого шару,%	Відносна глибина пористого шару, глибина шару/радіус гранули
Sample 1b	0,45	7,6	5,3	38	≈0,1
Sample 2	0,42	8	6	51	0,1-0,12
Sample 3	0,4	8,5	6,5	58	0,15-0,2
Sample 6	0,4	11,3	9,1	77	0,22-0,24
Sample 7b	0,38	12,6	8,7	63	≈0,2
Sample 8	0,34	13,3	8,5	61	0,15-0,2

Аналіз результатів вивчення морфології і показників якості зразків дозволив зробити такі висновки:

1. Структура гранул рядової аміачної селітри володіє певною пористістю, однак, це в більшості «механічні» пори (наслідок температурних напружень).

2. Термообробка гранул практично не впливає на утворення нанопор на поверхні. Практично термообробка призводить до зміни модифікації гранули до зменшення її щільності внаслідок «розпушення».

3. Зволоження гранул рядової аміачної селітри водою покращує показники якості ПАС, але трохи зменшує міцність гранули (досягається мінімальне значення, яке вимагають нормативні документи).

4. Використання в якості зволожувача розчину аміачної селітри призводить до істотного поліпшення показників якості ПАС.

5. Застосування інших зволожувачів (із запропонованих в даній роботі, без застосування пороутворюючих добавок) у вигляді розчинів або їх суміші не призводить до поліпшення основних показників якості ПАС (поглинальна та стримувальна здатності).

6. Час термообробки і кількість циклів термообробки значно впливає на міцність гранули. При цьому, внаслідок руйнування гранули, збільшується потенційний обсяг порот, в які може надходити дизельне паливо. Однак, стримувальна здатність гранули ПАС в цьому випадку значно знижується.

Для встановлення факту зміни кількості кисню в гранулі зразки 1b, 2, 6, 7b (вони були отримані різними способами тому взяті для порівняння з рядовий аміачною селітрою) було проведено додаткове дослідження з визначення елементного складу гранул. Результати досліджень (рис. 58) показали збільшення кількості кисню в гранулах, що є позитивним фактом і важливим висновком для оцінки ефективності ПАС.

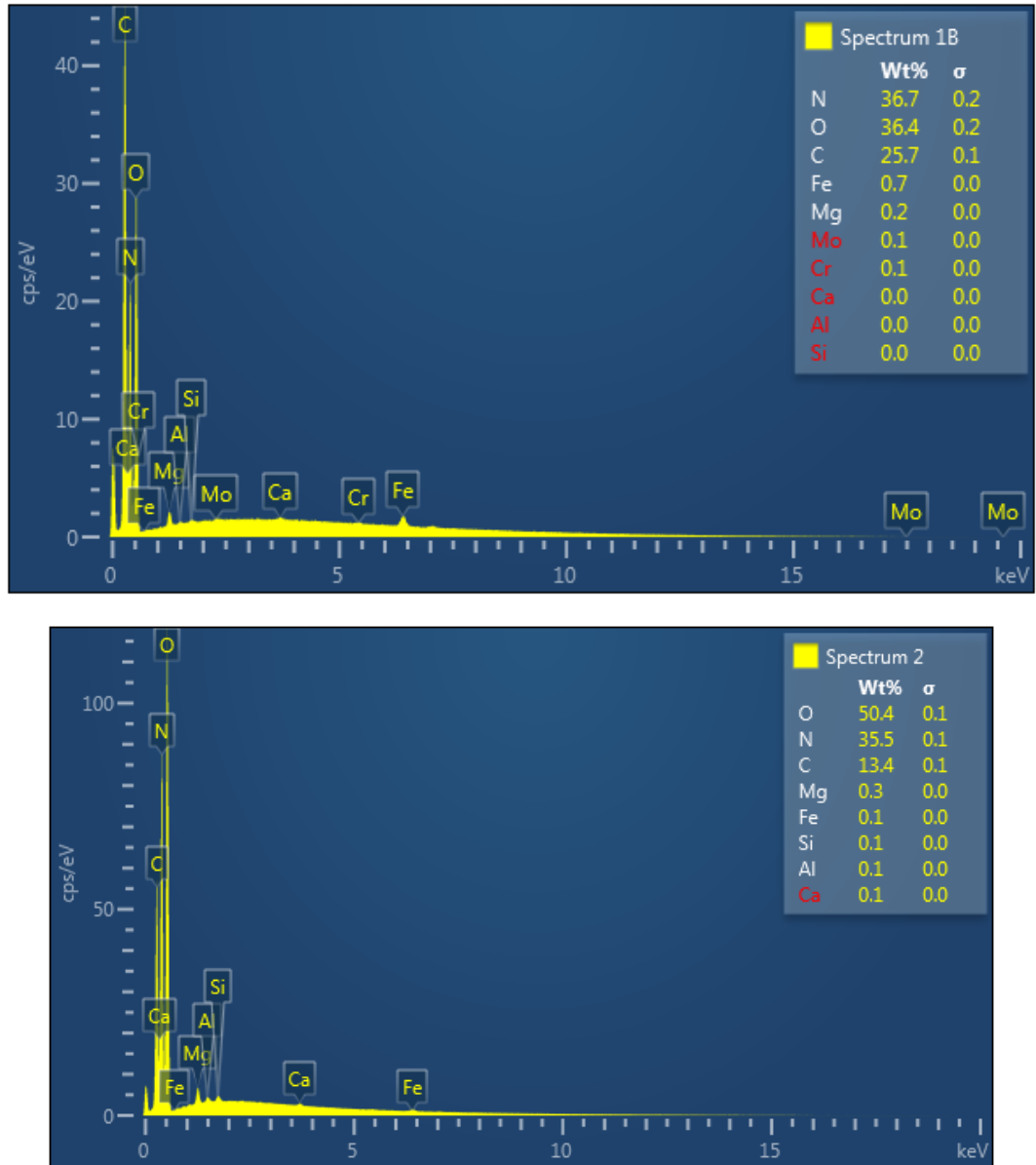


Рис. 58. Элементный состав гранул

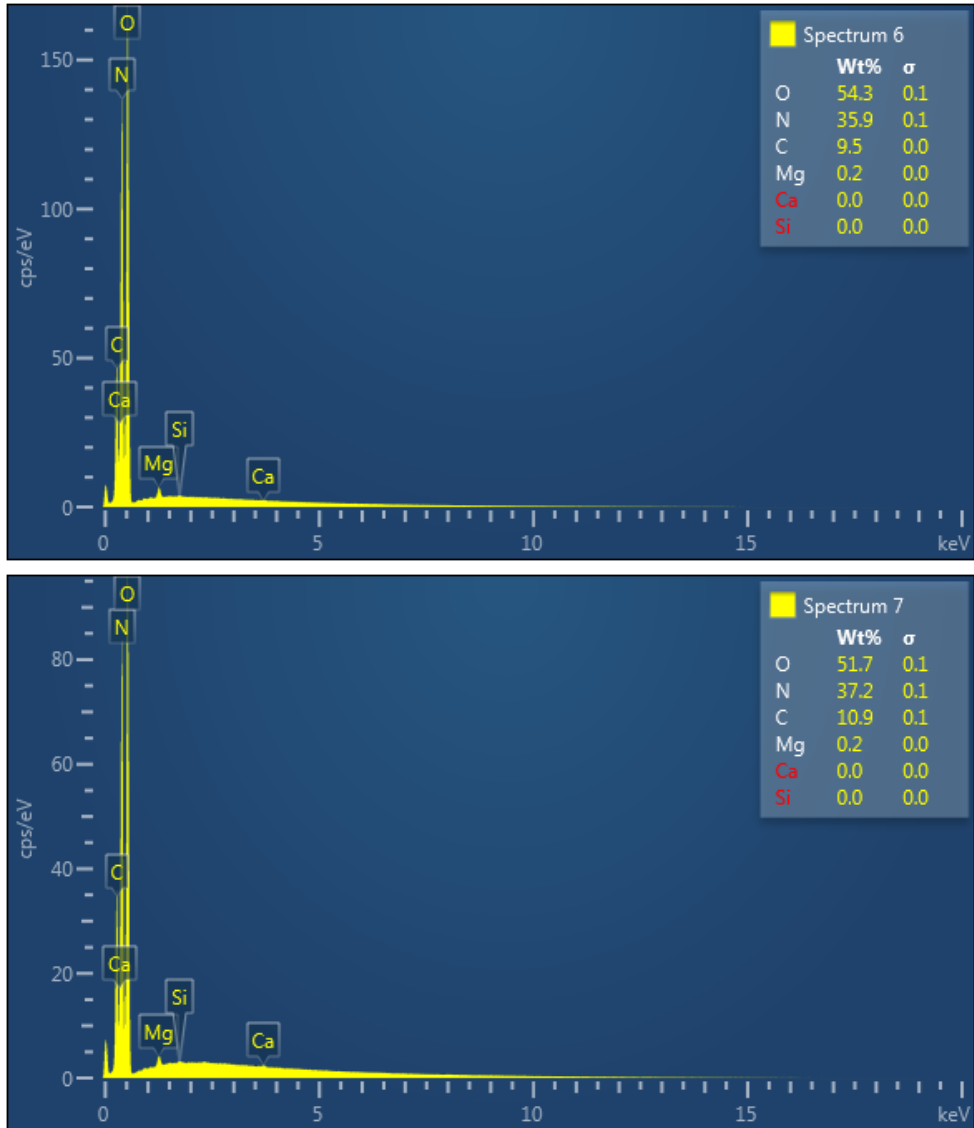


Рис. 58. Элементный состав гранул (продовження)

7 ТЕХНОЛОГІЧНА СХЕМА ВИРОБНИЦТВА ПАС ІЗ ВИКОРИСТАННЯМ ГРАНУЛЯЦІЙНОГО МОДУЛЯ.

7.1 Опис технологічної схеми

Грануляційний модуль періодичної дії для виробництва ПАС безбаштовим способом є ланцюжком технологічного обладнання, основним в якому є вихровий гранулятор псевдозрідженого шару. Ескіз грануляційного модуля наведено рис. 59.

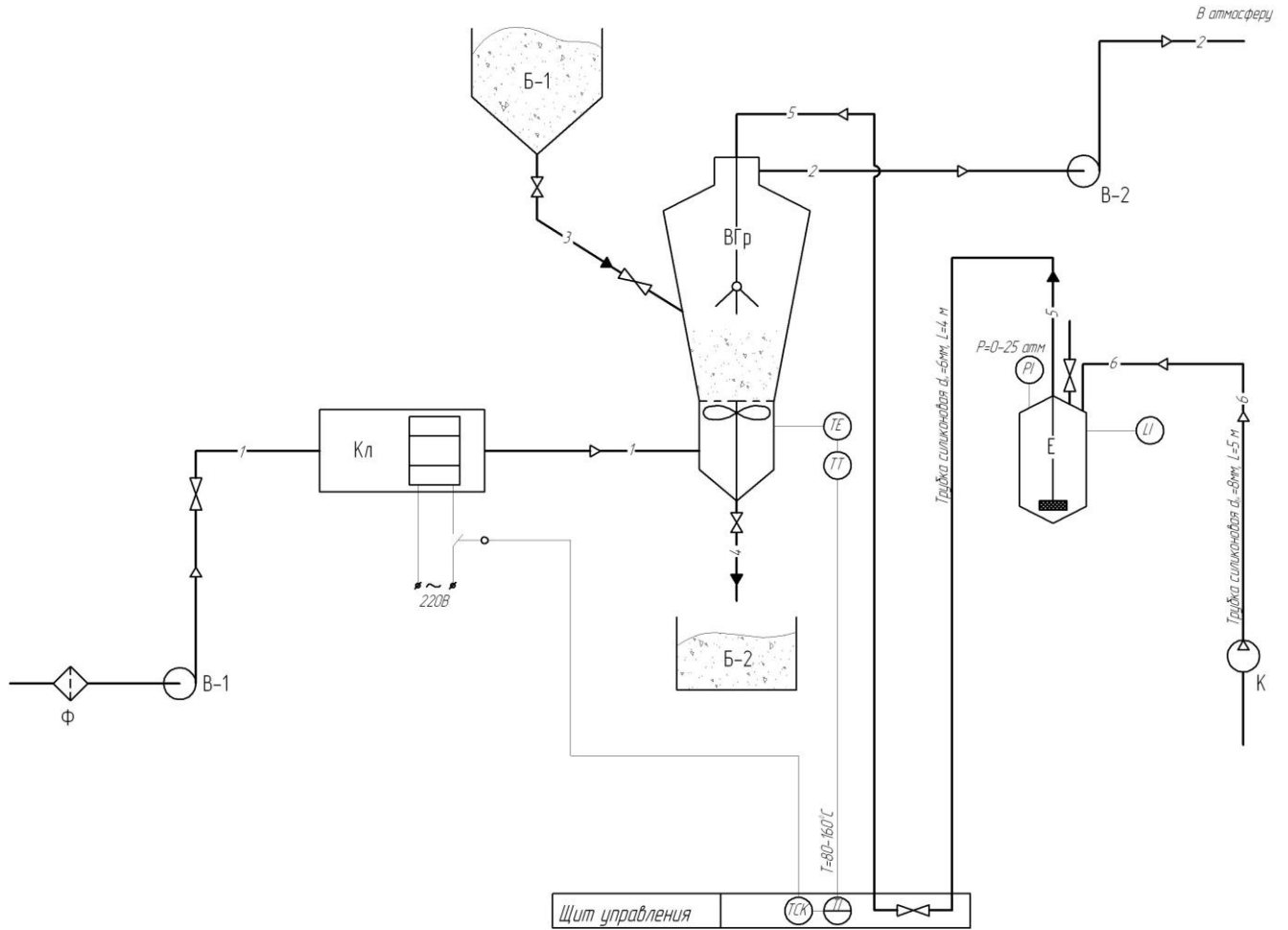


Рис. 59. Принципова технологічна схема грануляційного модуля виробництва ПАС: ВГр – вихровий гранулятор; Ф – фільтр; В – вентилятор; Кл –

калорифер; Б – бункер; К – компресор; Е – ємність для приготування розчину (теплогенеруючий агрегат)

В якості основної сировини для роботи грануляційного модуля використовується звичайна (рядова) гранульована аміачна селітра. З мішка порція аміачної селітри засипається в бункер Б, звідки подається до робочої зони вихрового гранулятора ВГр. Для регулювання подачі вихідної аміачної селітри гранулятор використовується шиберний затвор.

В якості робочого агенту у вихровому грануляторі використовується атмосферне повітря. Атмосферне повітря нагнітається вентилятором високого тиску В-1. Для запобігання засмоктування в повітропровід сторонніх предметів перед вентилятором встановлюється сітчастий повітряний фільтр Ф. Повітря подається вентилятором в електрокалорифер Кл, де нагрівається до робочої температури і далі подається в нижню частину гранулятора. Витрата повітря регулюється заслінкою. Для регулювання температури повітря, що подається в гранулятор, повинен бути передбачений автоматичний регулятор температури. Датчик контролю температури повітря встановлюється в нижню частину гранулятора. Сигнал від датчика надходить до автоматичного цифрового регулятора, змонтованого на щиті управління. Регулятор температури оснащується ручним механізмом встановлення температури нагрітого повітря. Регулятор температури підключений до електромагнітного реле, яке замикає та розмикає контакти включення електроденів калорифера, підтримуючи задану температуру повітря у нижній частині гранулятора.

Грануляційний модуль є періодично діючим, що передбачає його роботу в 4 різних технологічних режимах: нагрівання та зволоження, сушіння, охолодження та вивантаження. Тому доцільним є використання терморегулятора з 4-х і більше позиційним задатчиком робочої температури.

Одночасно із гранулами та повітрям в гранулятор подається розчин, що окремо готується. Попередньо підготовлений в теплогенеруючому агрегаті розчин

(5-6л) заправляється в ємність Е, після чого ємність герметизується і підключається до нагнітального патрубку повітряного компресора К продуктивністю 180 - 240 л в хвилину і максимальним тиском 8-10 атм. Стиснене повітря витісняє розчин із ємності по гнучкому шлангу через регулювальний вентиль, встановлений на щиті управління. Розчин надходить у гранулятор на розпилювальний пристрій, який диспергує рідину на псевдозріджений шар гранул. Для контролю та регулювання подачі розчину в робочу зону гранулятора на ємності має бути передбачений вимірювач рівня рідини.

Вивантаження готового продукту (ПАС) здійснюється через патрубок розвантаження нижньої частини гранулятора. Вивантаження здійснюється шляхом повороту розвантажувального патрубку у положення «відкрито». Дозування матеріалу, що вивантажується, здійснюється дозатором сипких матеріалів з опцією подальшої упаковки в тару (при закупівлі відповідного додаткового обладнання).

Для зниження запилення приміщення, в якому встановлюється експериментальна установка, на вихідному патрубку гранулятора може встановлюватися вентилятор В-2, аналогічний В-1.

Для підведення та відведення повітря до обладнання грануляційного модуля використовується гофрований шланг із алюмінію або нержавіючої сталі. Внутрішній діаметр шланга повинен дорівнювати 76 мм. Довжина гофрованих шлангів, необхідних для монтажу обладнання, визначається конфігурацією робочого приміщення та взаємного розташування обладнання.

Для подачі розчину з напірної ємності Е гранулятор використовується силіконовий армований шланг з внутрішнім діаметром 6мм. Мінімумально необхідна довжина шланга 4 – 5 м. Подача стисненого повітря від компресора до напірної ємності здійснюється по пластиковому гнучкому шлангу з внутрішнім діаметром 8 мм.

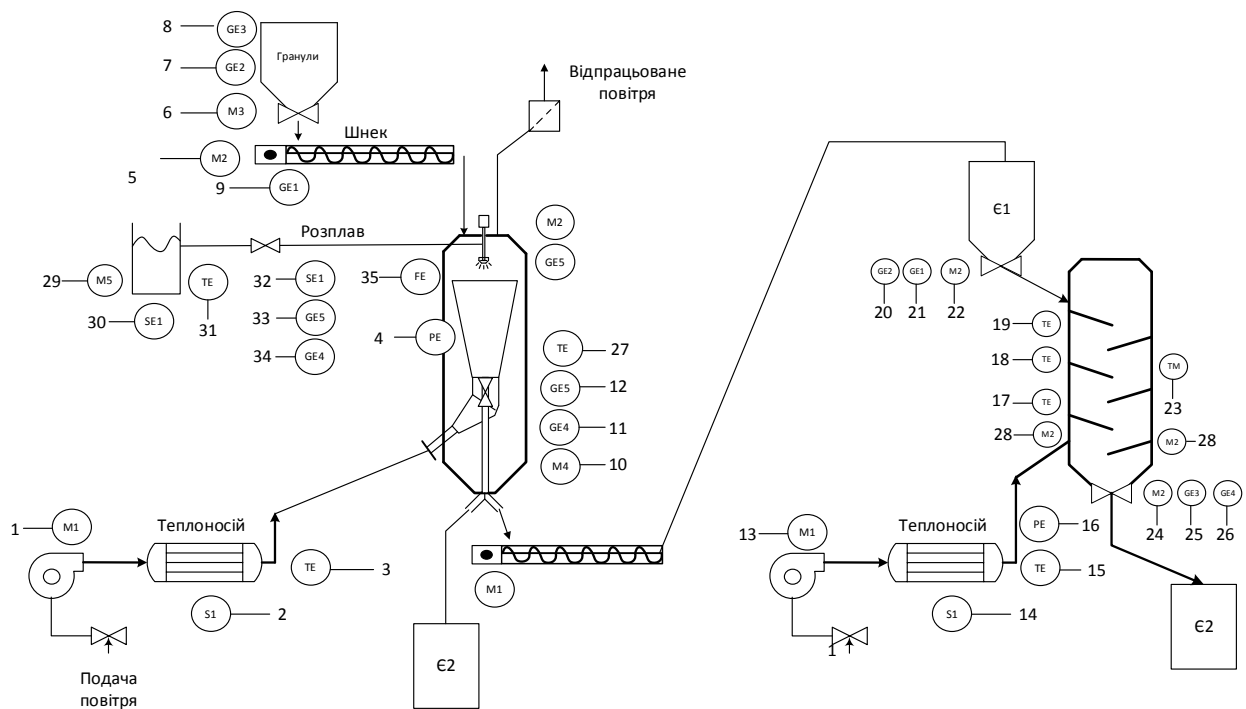


Рис. 60. Функціональна схема об'єкта управління

Функціональна схема процесу управління отриманням гранул ПАС, якою пропонується обладнати грануляційний модуль, зображена на рис. 60. Окремі елементи цієї системи представлені на рис. 61 і 62.

Готова сировина поступає в бункер, і готується для подальшого транспортування. По команді включається гвинтовий конвеєр M2, і подається команда на відкриття засувки M3. Коли гранули поступили на конвеєр, далі за допомогою індуктивного датчика відраховується порція, закривається засувка M3, та вимикається конвеєр.

Після завантаження гранулятора, включається вентилятор M1 на малих оборотах відповідно від заданої уставки датчик FE1 контролює тиск повітря, Далі подається команда на включення теплоносій на відповідну температуру, TE1 контролює температуру самого теплоносія, і два датчика температури TE1 та TE3 повідомляють температуру гранул температуру гранул. Після підготовки всіх виконавчих механізмів, починається перша фаза роботи гранулятора,

збільшуються обороти двигуна вентилятора на 38 гц, і підвищуємо температуру теплообмінника на 70С, при проходженні 3 мин. Далі подаємо команду на розпилювач, включається засувку SE1 і подається команда на включення насос М5, далі підраховуємо витрати розчину за допомогою Fe1 при досягненні уставки вимикаємо насос перекриваємо клапан SE1, і переходимо до другої фази роботи гранулятора. Друга фаза починається з того що збільшуємо обороти вентилятора до 50 гц і збільшуємо температуру до 120°С, і триває друга фаза 4-5 хв. Після закінчення другої фази, зменшуємо температур теплоносія, і зменшуємо обороти вентилятора до 10 гц час зменшення частоти вентилятора повинен становити 3-5мин. При досягненні часу включається транспортер М23, відкривається засувка М4, після вивантаження всіх гранул, закривається засувка М4 і відключається вентилятор до наступної партії.

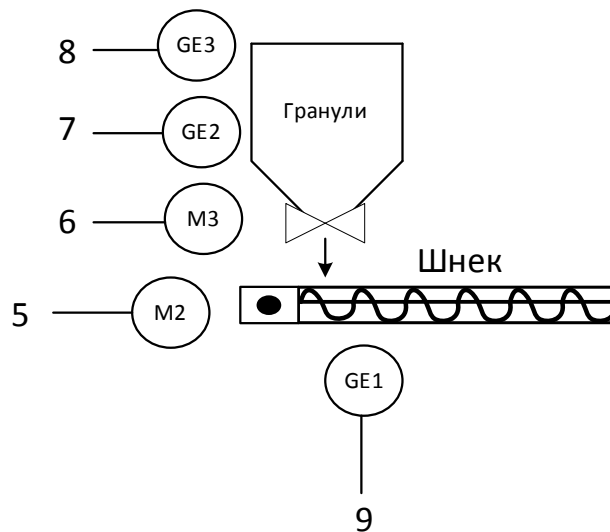


Рис. 61. Функціональна схема дозування

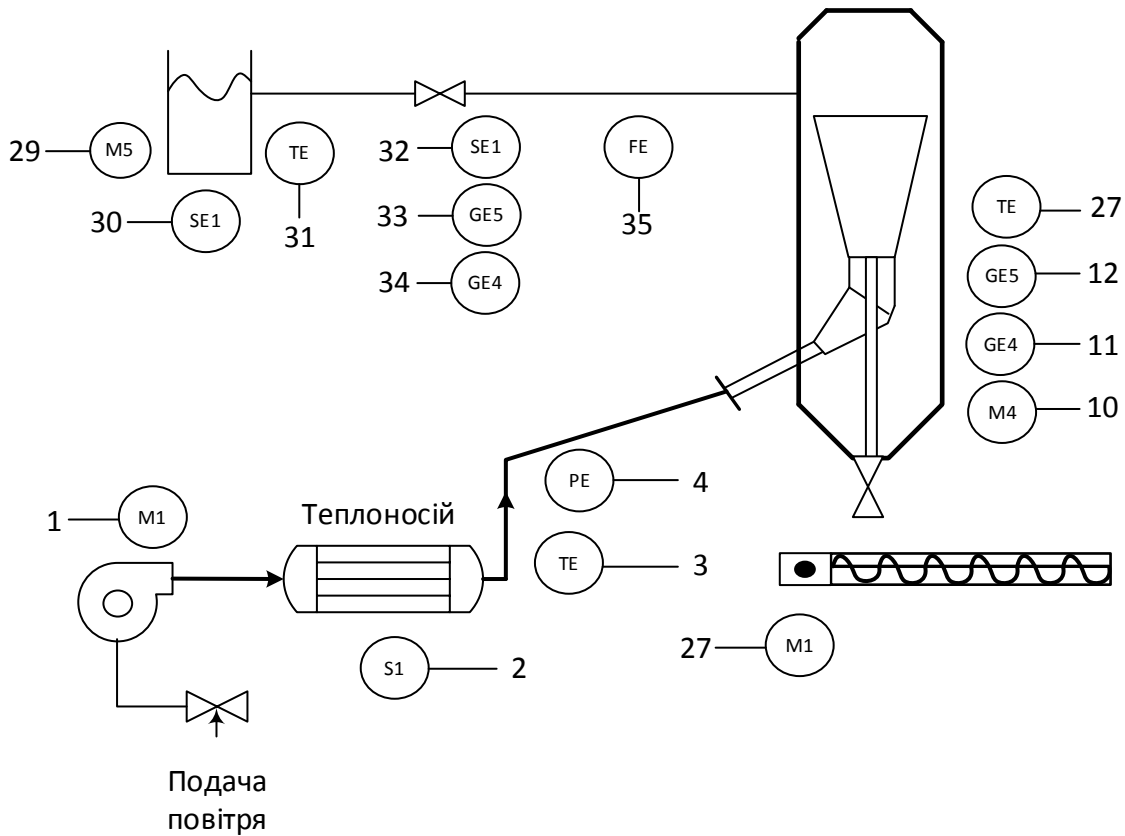


Рис. 62. Контур управління гранулятором

Опис алгоритму роботи системи автоматизації.

1. Оператор натискає кнопку «Ввімкн.» та вибирає автоматичний чи ручний режим роботи. У ручному режимі роботи встановлює час сушіння гранул, температуру сушіння та проводить регулювання порції подачі рідини та гранул. Після натискання кнопки «Старт» починається основний цикл роботи.

2. Проводиться перевірка рівня гранул, рівня води і температури в резервуарі. У разі відсутності розбіжностей між показниками датчиків та заданими значеннями переходимо до наступного пункту. У випадку виявлення показань датчиків, що не відповідають заданим значенням робота автоматичної системи зупиняється з висвітленням оператору відповідної помилки.

3. Система управління проводить запуск вентилятора подачі повітря на мінімально заданій швидкості та переходить до наступного етапу роботи. Алгоритм передбачає циклічну перевірку тиску в трубопроводі і, у разі, якщо тиск

менший за мінімально заданий, на екран оператора відправляється повідомлення відповідного змісту.

4. Далі відбувається відкриття шиберної заслінки на завантаження гранул, вмикається шнек.

подачі гранул. Розміщений в бункері з гранулами датчик рівня циклічно визначає рівень гранул на даний момент і зупиняє шнек завантаження гранул та закриває заслінку при досягненні заданої порції гранул. У той же час відбувається збільшення мінімальної швидкості подачі повітря. Даний пункт відповідає 1-й фазі сушіння гранул.

5. За допомогою лічильника рахуємо спрацювання індуктивного датчика, якщо датчик спрацював 10 раз, ми подаємо команду на стоп шнека, та закриття шиберної заслінки на завантаження бункера.

6. Система управління після виконання попередніх завдані переводить процес виготовлення гранул у фазу 2. При цьому відбувається поступове збільшення швидкості повітря в залежності від кількості поданої рідини. При цьому за показаннями давача витрати рідини циклічно перевіряється рівень витрати рідини, який повинен дорівнювати уставці. При досягненні кількості рідини до заданої подається команда на закриття електроклапана подачі рідини. У той же час паралельно подаємо команду відбувається включення теплообмінника і підтримуються задані межі температури повітря.

7. Під час 3-ї фази сушіння підтримується задана температура певний проміжок часу. Після чого здійснюється перехід до фази 4.

8. Під час 4 фази, у продовж заданого часу, поступово знижуємо швидкість подачі повітря та при закінченні процесу сушіння переводимо всі виконавчі механізми в стопове положення. Після цього активується шиберна заслінка на вивантаження гранул. Відкриття заслінки контролюється системою керування і у разі не відкриття чи не закриття заслінки на екран оператора відправляється повідомлення відповідного змісту.

7.2 Методика інженерного розрахунку вихрового гранулятора

Інженерний розрахунок вихрового гранулятора передбачає визначення конструкції окремих його елементів на основі кінетичного і гідродинамічного розрахунків процесу гранулювання у вихровому газовому потоці з високим ступенем турбулізації (рис. 63).

Початковими даними для інженерного розрахунку вихрового гранулятора є:

- виробнича потужність гранулятора;
- фізико-хімічні властивості потоків;
- початковий та необхідний кінцевий фракційний склад гранульованого матеріалу;
- якісні показники товарної фракції.

Алгоритм інженерного розрахунку вихрового гранулятора складається з окремих блоків, які логічно поєднані між собою (рис. 33). Нижче наведено зміст кожного з блоків.

Блок 1

Розрахунок часу прогріву гранули від початкової температури до температури теплоносія. Розрахунок зміни температури гранули за часом. Кінетика зміни температури гранули за радіусом.

Блок 2

Аналіз сил, що діють на гранулу у вихровому газовому потоці. Розрахунок полів складових швидкостей газового потоку і гранул за висотою і радіусом вихрового гранулятора. Визначення сумарної швидкості руху газового потоку і гранул та переважного напрямку руху потоків. Розрахунок траєкторії руху гранул. Розрахунок процесу класифікації гранул і сепарації дрібних частинок. Розрахунок процесу внутрішньої циркуляції ретурна. Розрахунок гідравлічного опору гранулятора і критичних швидкостей руху газового потоку.

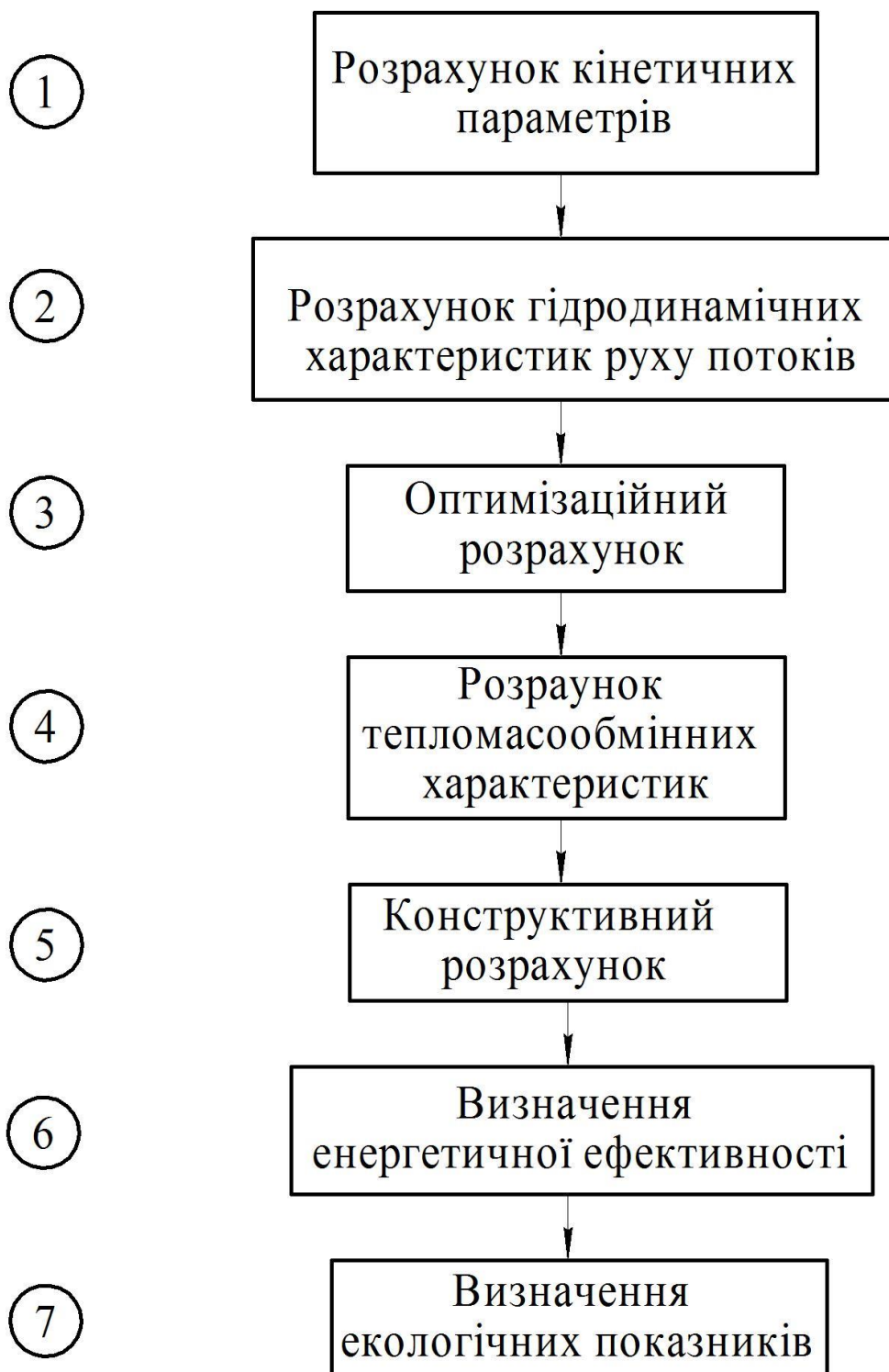


Рис. 63. Алгоритм інженерного розрахунку вихрового гранулятора

Блок 3

Співставлення даних кінетичного і гідродинамічного розрахунків. Перевірка дотримання умови, при якому «гідродинамічний» час перебування гранули в робочому просторі апарата повинен бути не меншим

«термодинамічного» часу, який визначається кінетикою процесу видалення вологи з гранули (при цьому необхідне виконання умови - «гідродинамічний» час не повинен перевищувати «термодинамічний» більш ніж на 5-10%). Визначення оптимального часу перебування гранул в робочому просторі вихрового гранулятора.

Блок 4

Розрахунок коефіцієнту теплопередачі та масопередачі. Визначення впливу гідродинамічних умов руху потоків на інтенсивність передачі тепла і масообміну під час гранулювання.

Блок 5

Матеріальний баланс процесу гранулювання (визначення витрат потоків відповідно до рис. 64).

Розрахунок конструктивних параметрів робочого простору вихрового гранулятора за умов здійснення процесу класифікації поліфракційної системи на фракції та забезпечення необхідного часу перебування гранул товарної фракції в апараті (визначення геометричних параметрів відповідно до рис. 3). Визначення загальних розмірів вихрового гранулятора з умов забезпечення внутрішньої циркуляції ретур. Розрахунок диспергатора (у разі одержання гранул з розчину або розплаву). Розрахунок діаметрів технологічних штуцерів. Розрахунок апарата на міцність.

Блок 6

Визначення витрат енергії на здійснення процесу гранулювання. Підбір оптимального співвідношення витрат теплоносія, ретур і рідкого матеріалу. Розрахунок граничного значення швидкості руху газового потоку, яке відповідає мінімальним затратам матеріальних ресурсів в перерахунку на 1 кг видаленої з гранул вологи.

Блок 7

Розрахунок фракційного складу пилу у газах, що відходять з гранулятора. Визначення оптимальної конструкції вузла утилізації газів, що відходять з гранулятора. Конструктивний розрахунок вузла утилізації газів, що відходять з гранулятора.

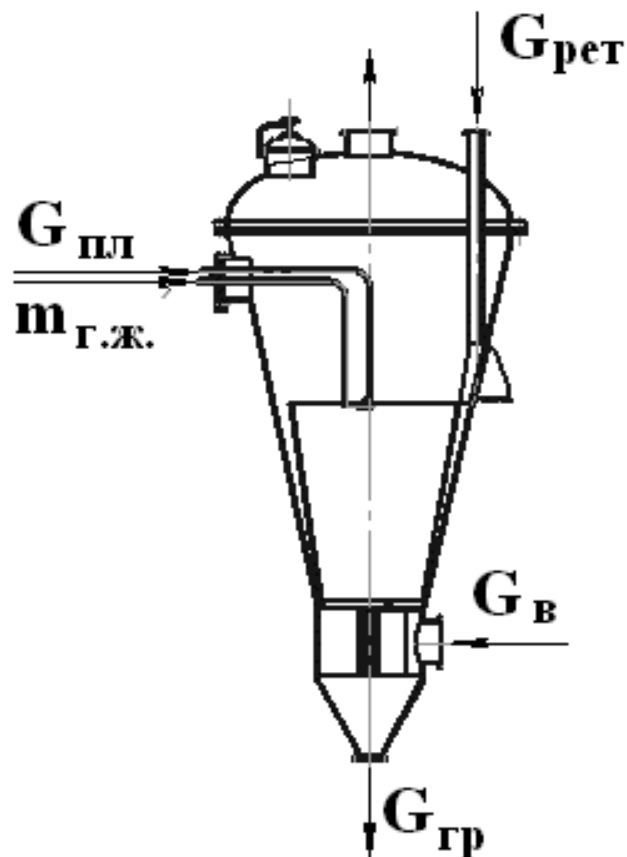


Рис. 64. Схема руху матеріальних потоків у вихровому грануляторі: $G_{гр}$ - продуктивність апарата; $G_{рет}$ - кількість ретуру, що надходить до гранулятора; $G_{пл}$ - кількість розплаву на розпилення; $G_{в}$ - витрата теплоносія; $m_{г.ж.}$ - витрата газу для пневматичного розпилення.

Розрахунок реалізовано на базі [49].

У гранулятор в якості вихідної сировини подаються розчин аміачної селітри і гранули аміачної селітри середнім діаметром 2 мм. Прийmemo, що на гранулу ретура необхідно нанести плівку розчину товщиною 0,2 мм, тоді об'єм розчину аміачної селітри на одній гранулі знайдемо по формулі

$$V = \frac{\pi}{6} \cdot (d_G^3 - d_P^3) \quad (66)$$

де d_G – діаметр гранули після нанесення на неї плівки розчину; приймаємо d_G рівним 2,4 мм; d_P – діаметр гранули ретурна; приймаємо d_P рівним 2 мм.

$$V = \frac{3,14}{6} \cdot (0,0024^3 - 0,002^3) = 3,049 \cdot 10^{-9} \text{ м}^3$$

Маса розчину аміачної селітри на одній гранулі

$$m_{\text{пл}} = V \cdot \rho_{\text{пл}} \quad (67)$$

де $\rho_{\text{пл}}$ – густина розчину аміачної селітри.

$$\rho_{\text{пл}} = x \cdot \rho_B + (1-x) \rho_{AC} \quad (68)$$

де ρ_{AC} – густина аміачної селітри в рідкому стані;

ρ_B – густина води;

x – масова частка води в розчині аміачної селітри.

$$\rho_{\text{пл}} = 0,3 \cdot 1000 + (1-0,3)1200 = 1140 \text{ кг/м}^3$$

$$m_{\text{пл}} = 3,049 \cdot 10^{-9} \cdot 1140 = 3,48 \cdot 10^{-6} \text{ кг}$$

Об'єм гранули ретурна знаходимо як об'єм кулі діаметром 2 мм

$$V_P = \frac{3,14}{6} 0,002^3 = 4,19 \cdot 10^{-9} \text{ м}^3$$

Маса гранули ретурна

$$m_P = 4,19 \cdot 10^{-9} \cdot 1725 = 7,23 \cdot 10^{-6} \text{ кг}$$

де 1725 кг/м³ – густина аміачної селітри.

Маса одержуваної гранули

$$m = 7,23 \cdot 10^{-6} + 3,48 \cdot 10^{-6} = 10,7 \cdot 10^{-6} \text{ кг}$$

Тоді кількість гранул вироблена за 1 добу роботи гранулятора при продуктивності 3000 кг/добу.

$$N = \frac{3000}{10,7 \cdot 10^{-6}} = 2,802 \cdot 10^8 \text{ шт}$$

Тоді кількість ретурна яку необхідно подавати в гранулятор дорівнюватиме

$$G_p = N \cdot m_p \quad (69)$$

$$G_p = 2,802 \cdot 10^8 \cdot 7,23 \cdot 10^{-6} = 1608 \text{ кг / добу}$$

Кількість плаву, яку необхідно подавати в гранулятор знайдемо з матеріального балансу

$$G_{III} = 3000 - 1608 = 1392 \text{ кг / добу}$$

Кількість повітря, необхідного для проведення процесу сушіння отриманих гранул визначаємо за рівнянням

$$Q_B = \frac{G_{III} \cdot x}{(X_1 - X_2)} \quad (70)$$

де X_1 і X_2 - вологовміст повітря на вході і виході з гранулятора.

Вологовміст повітря на вході і виході з апарату визначаємо по діаграмі Рамзіна.

Тоді необхідна витрата повітря

$$Q_B = \frac{1392 \cdot 0,3}{(38 - 10) \cdot 10^{-3}} = 15000 \text{ кг / добу}$$

Густина повітря при робочій температурі в грануляторі 100°C знайдемо по формулі

$$\rho_B^T = \rho_B^0 \cdot \frac{273}{T} \cdot \frac{P}{P_0} \quad (71)$$

де ρ_B^0 – густина повітря при н.у.;

T – робоча температура;

P – робочий тиск.

$$\rho_B^T = 1,293 \cdot \frac{273}{373} \cdot \frac{0,1}{0,1} = 0,95 \text{ кг / м}^3$$

Об'ємна витрата повітря на процес гранулювання

$$V_B = \frac{Q_B}{\rho_B^T} \quad (72)$$

$$V_B = \frac{15000}{0,95} = 15789 \text{ м}^3 / \text{добу} \text{ або } 4,39 \text{ м}^3 / \text{с} \quad (73)$$

Теплові (енергетичні баланси).

Вихідні дані:

Продуктивність по готовому продукту $G_k = 3000$ кг / добу = 0,035кг / с

Середній розмір гранул 2 мм

Температура сушильного агента на вході в гранулятор 120 С

Температура сушильного агента на виході з гранулятора 70 С

Продуктивність зволожувача $V_y = 4$ м³/с

Початкова вологість зволожувача 100%

Порозність $\varepsilon = 0,6$

Параметри повітря на вході в калорифер $t_0 = 18^\circ\text{C}$ і $\varphi = 72\%$

Густина повітря ρ_ε рівна:

$$\rho_\varepsilon = \frac{M_{c.B.} \times T_0}{\nu_0 \times (T_0 + T_\varepsilon)} \quad (74)$$

$$\rho_\varepsilon = \frac{29 \times 273}{22.4 \times (273 + 20)} = 1.2 \text{ кг / м}^3$$

Переведемо об'ємну витрату зволожувача в масову, кг/с

$$G_y = V_y \rho_\varepsilon \quad (75)$$

$$G_y = 4 \cdot 1,2 = 4,8$$

Витрата вологи із зволожувачем, кг/с

$$W = G_y x$$

x – вологовміст зволожувача при 100% вологості. Вологовміст зволожувача знаходиться по І-х - діаграмі вологого повітря, $x = 0,015$ кг/кг

$$W = 4,8 \cdot 0,015 = 0,072 \text{ кг/с}$$

В ході процесу грануляції і сушки волога введена з зволожувачем повністю випаруватися з поверхні гранул, тому можна вважати, що кількість вологи видаляється в грануляторі 0,072 кг / с.

Запишемо рівняння внутрішнього теплового балансу сушарки

$$\Delta = c\Theta_1 + q_{\text{дон}} - (q_m + q_{\text{м}} + q_n) \quad (76)$$

де Δ - різниця між питомим приходом і витратою тепла безпосередньо в сушильній камері

c - теплоємність вологи у вологому матеріалі, кДж/кг·К

$q_{\text{дон}}$ - питоме додаткове підведення тепла в сушарку, кДж/кг

q_m - питома витрата тепла в сушарці з транспортними пристроями, кДж/кг

$q_{\text{м}}$ - питома витрата тепла в сушарці з висушуваним матеріалом, кДж/кг·К

$$q_m = \frac{G_k c_m (\Theta_2 - \Theta_1)}{W} \quad (77)$$

де Θ_2 - температура висушеного матеріалу на виході з сушарки, С.

Приймається на 2 градуси нижче, ніж температура газів, що відходять;

q_n - питомі втрати тепла в навколишнє середовище, кДж/кг.

$$\Delta = 4,19 \cdot 20 - 0,035 \cdot 0,5(68 - 20) / 0,072 - 22,6 = 49,5 \text{ кДж/кг вологи}$$

Запишемо рівняння робочої лінії сушіння:

$$I = I_1 - \Delta(x - x_1) \quad (78)$$

На діаграмі I-x (рис. 65) – за відомими параметрами $t_0 = 18^\circ\text{C}$ и $\varphi = 72\%$ знаходимо вологовміст x_0 і ентальпію I_0 свіжого повітря: $x_0 = 0,0092$ кг вологи / кг сухого повітря; $I_0 = 41,9$ кДж/кг сухого повітря.

При нагріванні повітря до температури $t_1 = 120^\circ\text{C}$ його ентальпія збільшується до $I_1 = 150$ кДж/кг; так як нагрів сушильного агента здійснюється через стінку, вологовміст залишається постійним: $x_0 = x_1$. Для визначення параметрів відпрацьованого повітря необхідно на діаграмі I-x побудувати робочу лінію сушки. Задаємо довільне значення вмісту вологи повітря $x = 0,04$. Відповідне йому значення ентальпії знаходимо за рівнянням:

$$I = 150 - 49,5(0,04 - 0,0092) = 148 \text{ кДж/кг сухого повітря.}$$

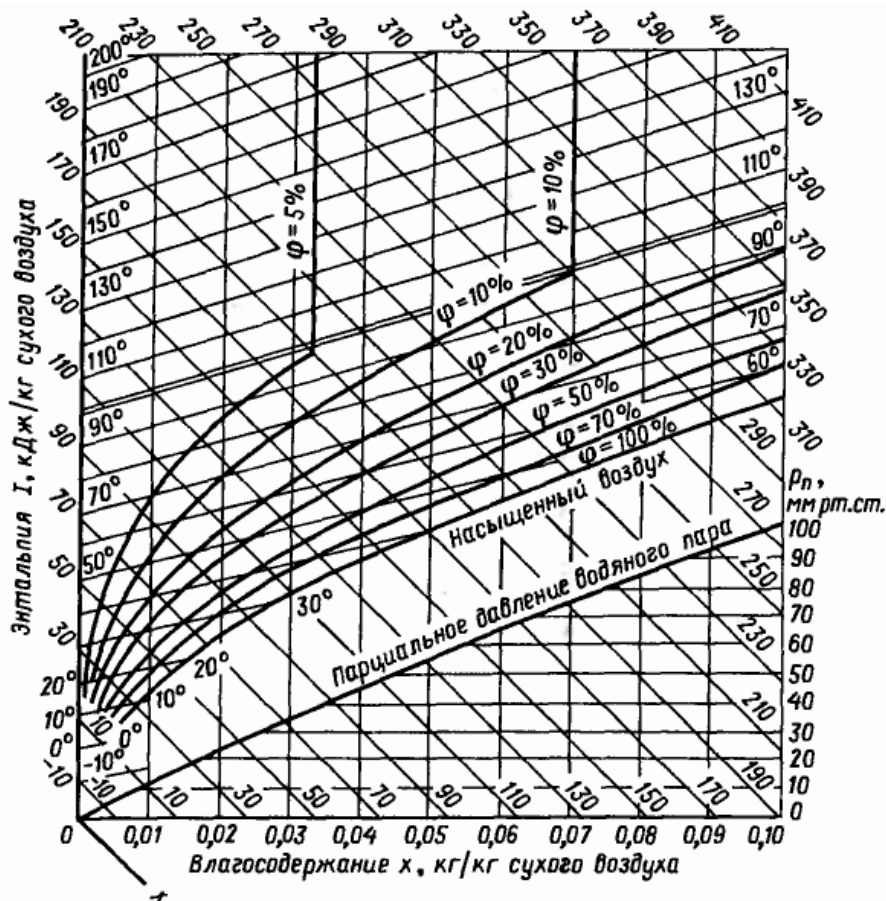


Рис. 65. Діаграма стану вологого повітря $I - x$

Далі проводимо лінію сушіння на діаграмі $I - x$ через дві точки з координатами $x_0 = x_1 = 0,0092$ кг/кг, $I_1 = 150$ кДж/кг і $x = 0,04$ кг/кг, $I = 148$ кДж/кг до перетину з заданим параметром відпрацьованого повітря $t_2 = 70^\circ\text{C}$. У точці перетину лінії сушіння і ізотерми 70°C (див. рис. 0) знаходимо кінцевий вологовміст відпрацьованого повітря $x_2 = 0,032$ кг/кг.

Витрата сухого повітря L :

$$L = W / (x_2 - x_0) \quad (79)$$

$$L = 0,072 / (0,032 - 0,0092) = 3,16 \text{ кг/с}$$

Середня температура t_{cp} повітря в грануляторі:

$$t_{cp} = (t_1 + t_2) / 2 \quad (80)$$

$$t_{cp} = (70 + 120) / 2 = 95^\circ\text{C}$$

Середній вологовміст x_{cp} повітря в грануляторі

$$x_{cp} = x_0 + x_2/2 \quad (81)$$

$$x_{cp} = 0.032 + 0.0092/2 = 0.0206 \text{ кг вологи / кг сухого повітря}$$

Середня густина повітря ρ_{cp} і водяної пари ρ_6 рівна:

$$\rho_{cp} = \frac{M_{c.в.} \times T_0}{\nu_0 \times (T_0 + T_{cp})} \quad (82)$$

$$\rho_{cp} = \frac{29 \times 273}{22.4 \times (273 + 95)} = 0.906 \text{ кг / м}^3$$

$$\rho_6 = \frac{18 \times 273}{22.4 \times (273 + 95)} = 0.596 \text{ кг / м}^3$$

Середня об'ємна продуктивність по повітрю V :

$$V = L / \rho_{cp} + x_{cp} L / \rho_6 \quad (83)$$

$$V = 3.16 / 0.906 + 0.0206 \cdot 3.16 / 0.596 = 3.6 \text{ м}^3/\text{с}$$

Розрахунок гідравлічного опору гранулятора

Гідравлічний опір гранулятора розраховуємо як гідравлічний опір зваженого шару матеріалу за формулою:

$$\Delta P = \frac{3}{2} \cdot \frac{1 - \varepsilon}{\varepsilon^3 \cdot \Phi} \cdot \left(\frac{133}{\text{Re}} + 2.34 \right) \cdot \frac{H}{d} \cdot \frac{\rho_B \cdot w^2}{2}, \quad (84)$$

де ε - порозність зваженого шару;

Φ - фактор форми; для шароподібних часток рівний 1;

$$\Delta P = \frac{3}{2} \cdot \frac{1 - 0.6}{0.6^3 \cdot 1} \cdot \left(\frac{133}{350} + 2.34 \right) \cdot \frac{0.4}{2.0 \cdot 10^{-3}} \cdot \frac{0.906 \cdot 3.53^2}{2} = 25550 \text{ Па} \quad (85)$$

8 КОМП'ЮТЕРНА ПРОГРАМА ДЛЯ ТЕХНОЛОГІЧНОГО І КОНСТРУКТИВНОГО РОЗРАХУНКУ ВИХРОВОГО ГРАНУЛЯТОРА

Автоматизувати процес визначення основних розмірів вихрового гранулятора і технологічних параметрів його роботи можливо за рахунок створення окремої комп'ютерної програми оптимізаційного розрахунку. В якості вихідних даних ця програма буде використовувати властивості основних технологічних потоків та їх витрати, результат розрахунку – основні конструктивні розміри вихрового гранулятора і оптимальний (визначений за даними експериментальних досліджень) режим його роботи.

Для підготовки охоронних документів (авторських свідоцтв) на розроблені комп'ютерні програми та з метою потенційної їх комерціалізації назви програм подані англійською мовою із збереженням україномовного інтерфейсу.

8.1 Керівництво користувача програми Granulation Unit

Загальні відомості

Комп'ютерна програма Granulation Unit призначена для технологічного і конструктивного розрахунку вихрового гранулятора для одержання гранул з розчинів або розплавів, а також формування пористої структури на поверхні і в приповерхневих шарах гранул методом зволоження з наступною термообробкою. Користувач звертається до окремих підпрограм, які реалізовані у вигляді окремих блоків загального алгоритму інженерного розрахунку вихрового гранулятора. Послідовними розрахунками визначаються основні технологічні параметри здійснення процесу гранулювання, особливості конструктивного оформлення та конкретні розміри вихрового гранулятора.

Для роботи програми на комп'ютері користувача повинен бути інстальований компонент Java.

Початкове вікно

Для запуску програми запусить файл GranUnit.jar. При вдалому запуску сервісу з'являється початкове вікно програми (рис. 66) з чотирма вкладками-підпрограмами (Multistage fluidizer, Equilibrium of drop, Classification in vortex flow, Vortex granulator, які є авторськими розробками) та теоретичними відомостями (Theoretical basics, рис.67).

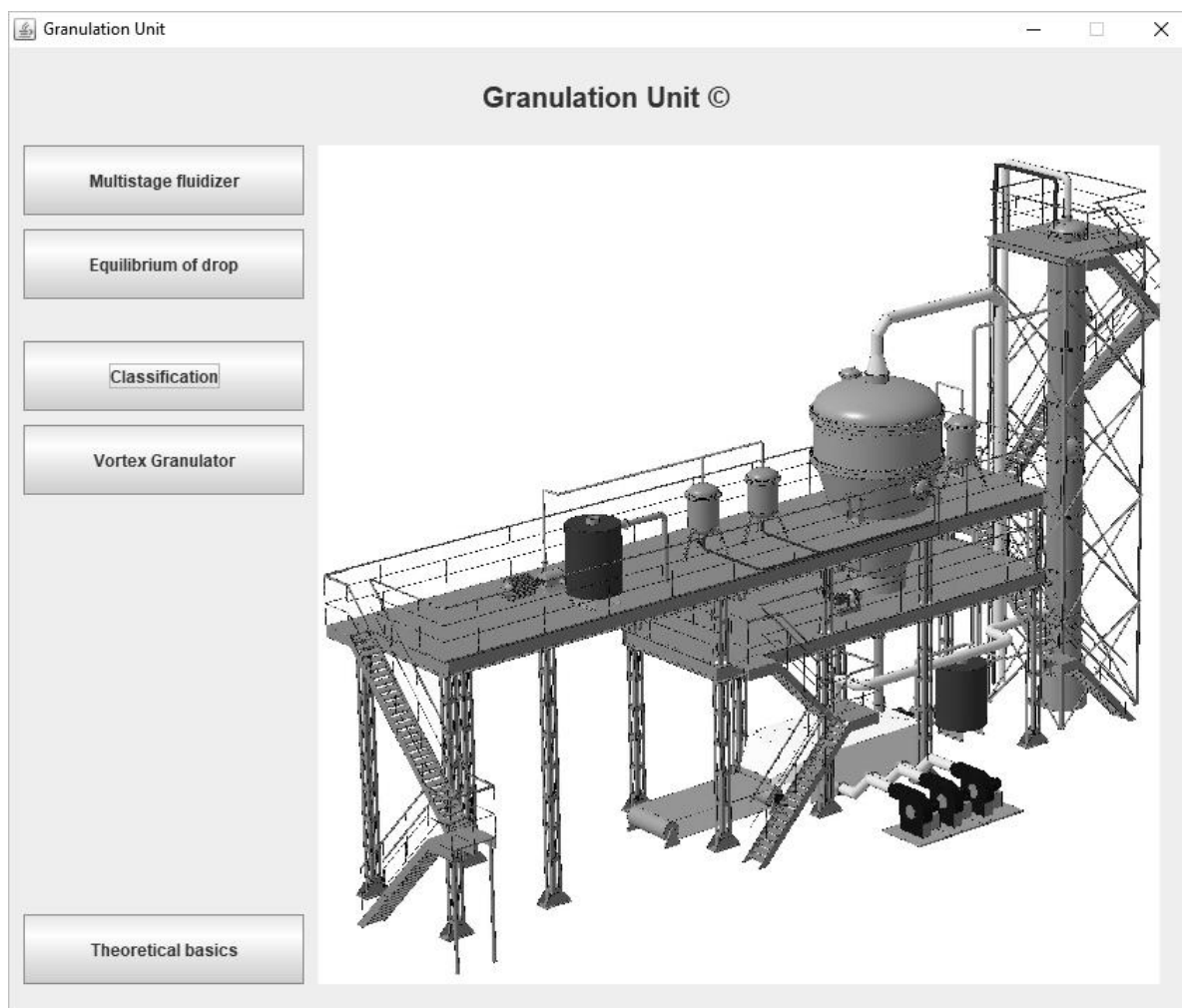
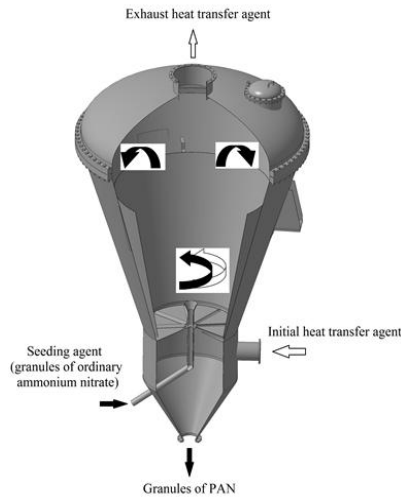


Рис. 66. Початкове вікно програми Granulation Unit

Натиснувши на кнопку **Theoretical basics** ми перейдемо до сторінки з теоретичними відомостями до програми.

The vortex granulator operates as follows.



The high heating agent is tangentially supplied to the granulator through the relevant sleeve and then it is transferred to the vortex gas-distributing hub. While moving through the hub, the agent rotates about the vertical axis and gets a helical motion. Damp granules are added to the helical motion flows. While contacting with the axisymmetric vortex flows of the heating agent, the granules are subject to the overcut heating with dehydration, formation of the porous surface layer, and drying in the heat flows. The weight of the granules is gradually reducing.

Depending on the weight (size), the granules are classified into light and heavy (fine and large) fractions in response to the change of the circular and axial velocity of the axisymmetric vortex flows of the heating agent within the height of the work space. The produced porous granules are transferred from the upper overcut of the inner cone to the annular space toward the outlet sleeve. The heavy fraction remains in the work space, and while the weight is reducing, the fraction circulates in the inner cone and then moves to its upper overcut. The exhaust heating agent is removed from the granulator through the sleeve in its upper part.

Рис. 67. Вкладка «Theoretical basics»

Підпрограми Multistage fluidizer та Equilibrium of drop відриваються за допомогою браузера, підпрограми Classification in vortex flow та Vortex granulator – за допомогою інтерфейсу Java. Натиснувши на відповідні вкладки, користувач запускає необхідну йому підпрограму.

Multistage fluidizer (рис.68).

«Multistage fluidizer»

Initial data

Rate of gas flow $Q(m^3/s)$	Radius of the granule $r_g(m)$
<input type="text" value="0.5"/>	<input type="text" value="0.001"/>
Length of device $L(m)$	Granule density $\rho_g(kg/m^3)$
<input type="text" value="1"/>	<input type="text" value="1650"/>
Overall width of device $h(m)$	Gas density $\rho_g(kg/m^3)$
<input type="text" value="0.5"/>	<input type="text" value="1"/>
Length of shelf $L_s(m)$	Acceleration of gravity $g(m/s^2)$
<input type="text" value="0.4"/>	<input type="text" value="9.81"/>
Degree of perforation (free area) δ	Resistance coefficient ξ
<input type="text" value="0.1"/>	<input type="text" value="0.44"/>
Perforation hole diameter $d(m)$	Volumetric content of a dispersed phase in a two-phase flow ψ
<input type="text" value="0.005"/>	<input type="text" value="0.3"/>
Tilt angle of shelf $\gamma(degr)$	Coefficient that takes into account the tightness of the flow m
<input type="text" value="35"/>	<input type="text" value="16"/>

Рис. 68. Вікно переходу до підпрограми Multistage fluidizer

Equilibrium of drop (рис.69).

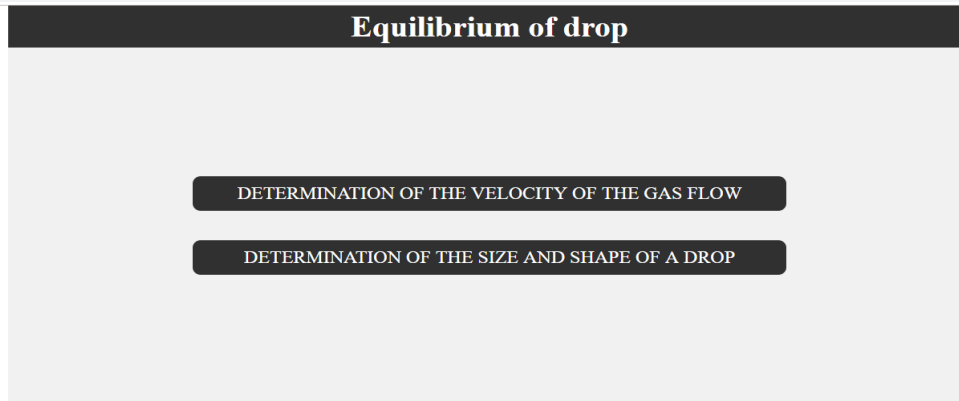


Рис. 69. Вікно переходу до підпрограми Equilibrium of drop
Classification in vortex flow (рис.70).

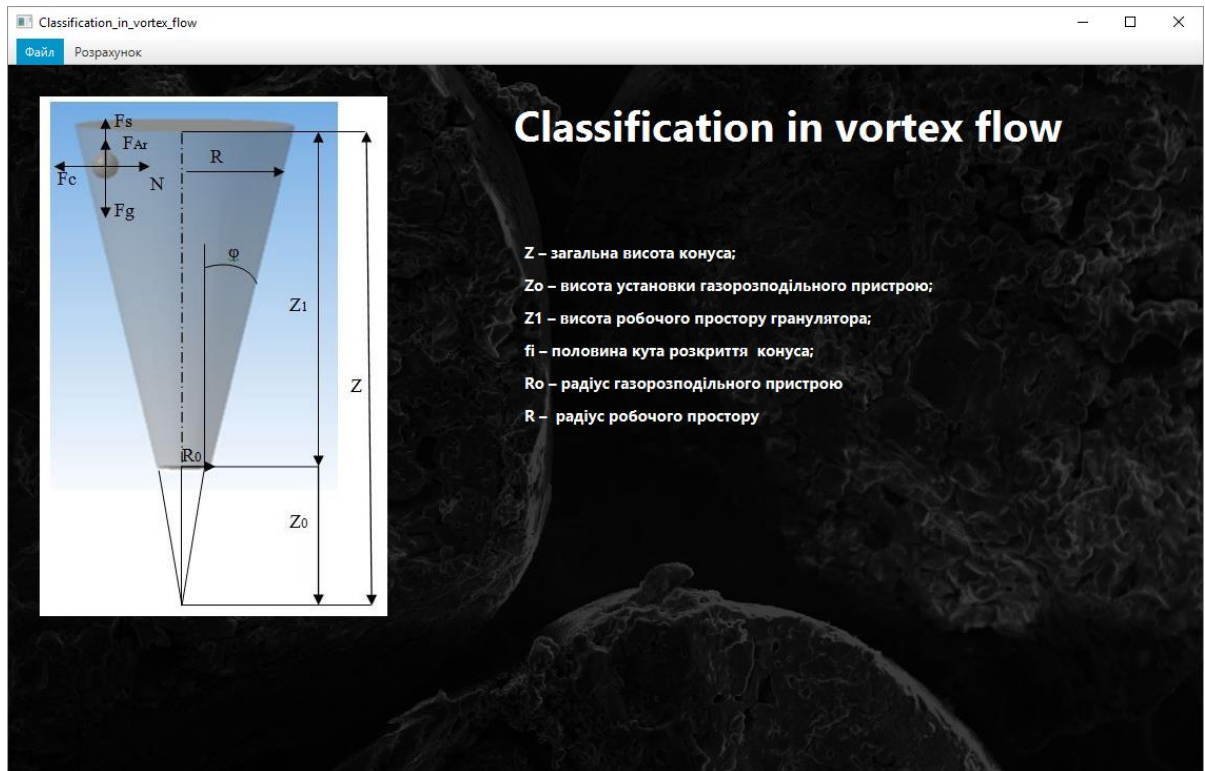


Рис. 70. Вікно переходу до підпрограми Classification in vortex flow

Vortex granulator (рис.71).

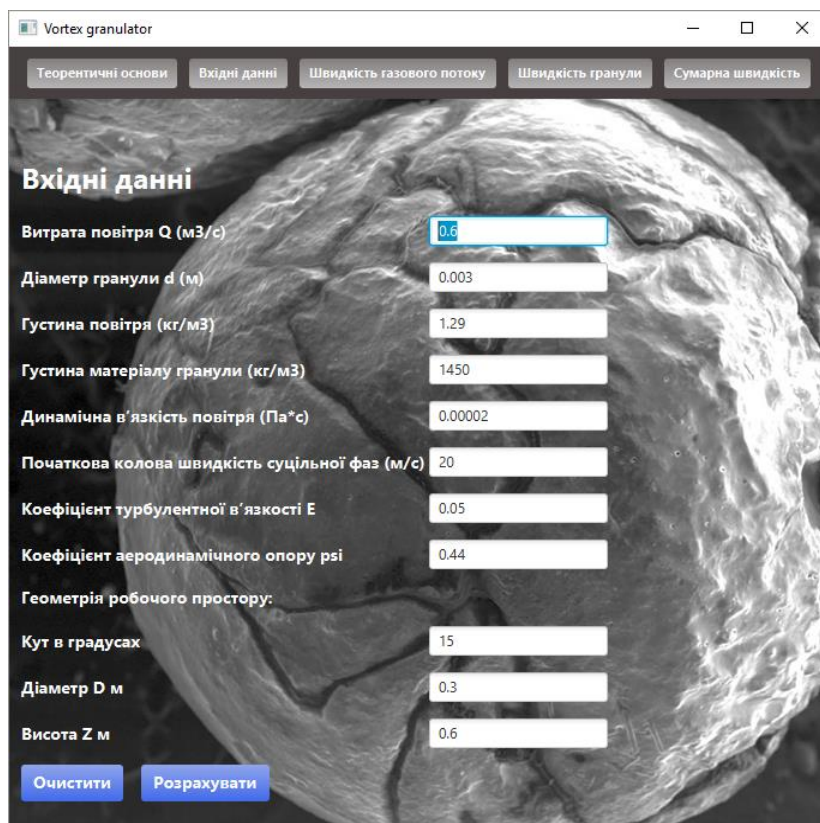


Рис. 71. Вікно переходу до підпрограми Vortex granulator

8.2 Керівництво користувача програми Vortex Granulator

Програма Vortex Granulator призначена для розрахунку гідродинамічних показників однофазного та двофазного потоків у робочому просторі вихрового гранулятора.

Програма написана на мові програмування Java.

Програма має 5 пунктів меню, «Теоретичні основи», «Вхідні данні», «Швидкість газового потоку», «Швидкість гранули» та «Сумарна швидкість» (рис. 72).

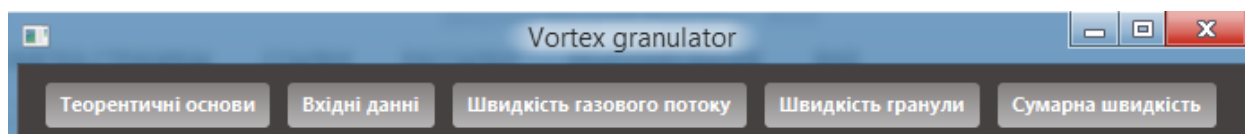


Рис. 72. Меню програми

Теоретичні основи

Даний пункт містить теоретичні відомості про гранулятори (рис. 73).

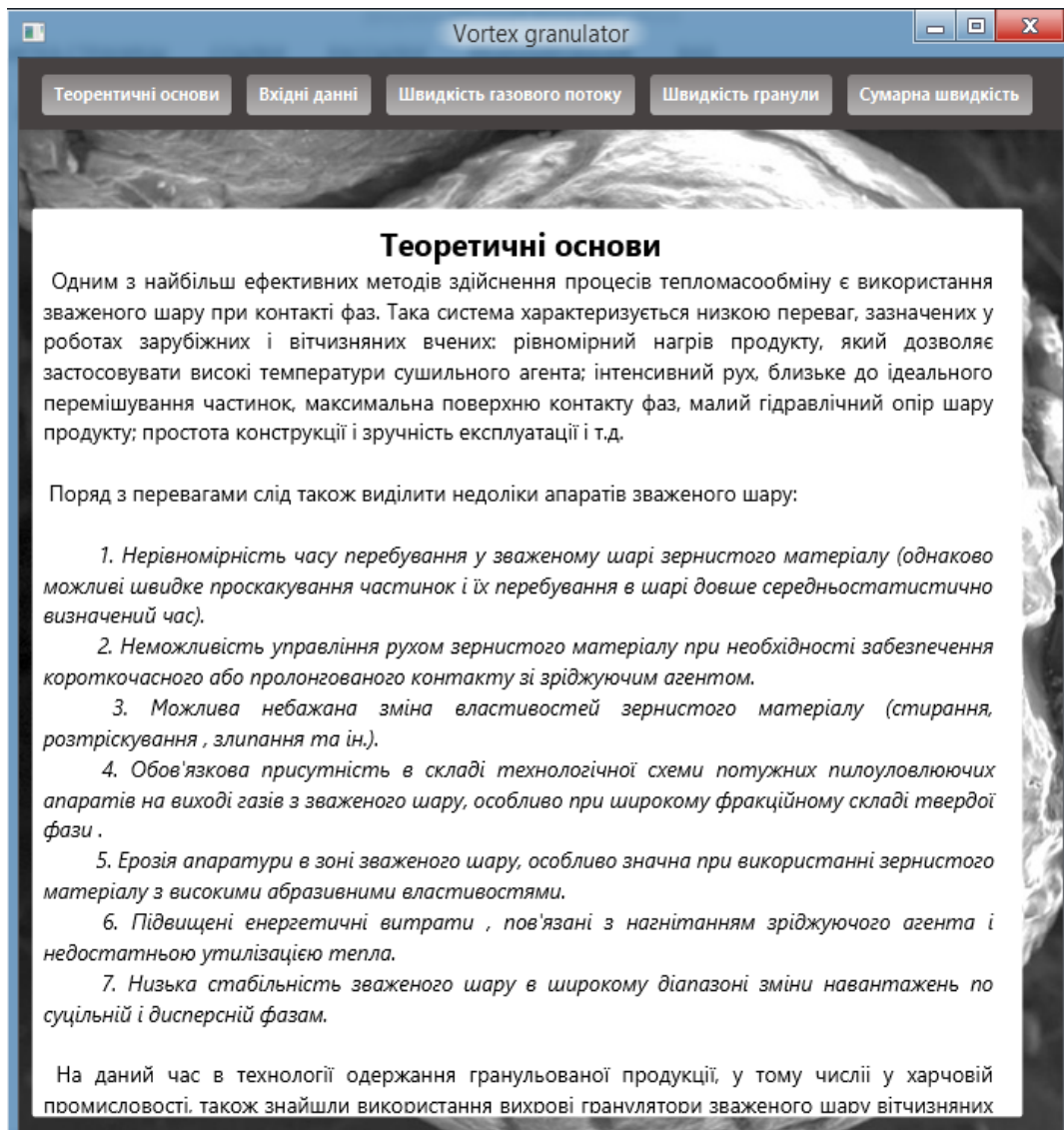


Рис. 73. Теоретичні основи

Вхідні дані

Даний пункт містить форми введення даних, після яких програма буде обраховувати швидкості газового потоку та гранул (рис. 74).

Вхідні данні

Витрата повітря Q (м ³ /с)	0.6
Діаметр гранули d (м)	0.003
Густина повітря (кг/м ³)	1.29
Густина матеріалу гранули (кг/м ³)	1450
Динамічна в'язкість повітря (Па·с)	0.00002
Початкова колова швидкість суцільної фаз (м/с)	20
Коефіцієнт турбулентної в'язкості E	0.05
Коефіцієнт аеродинамічного опору ρs_i	0.44
Геометрія робочого простору:	
Кут в градусах	15
Діаметр D м	0.3
Висота Z м	0.6

Очистити Розрахувати

Рис. 74. Вхідні данні

Увага!

Данні в формі вводу повинні бути введені коректно! Якщо число дробове, воно повинно бути введено через крапку «0.5», якщо воно буде введено через кому або буде введено щось інше, програма покаже помилку.

Правильно введені дані (рис. 75)

Вхідні данні

Витрата повітря Q (м³/с)

Діаметр гранули d (м)

Рис. 75. Коректні дані

Неправильно введені дані (рис. 76)

Вхідні данні

Витрата повітря Q (м³/с)

Діаметр гранули d (м)

Рис. 76. Некоректні дані

Якщо дані буде введені неправильно, програма виведе сповіщення про помилку (рис. 77).

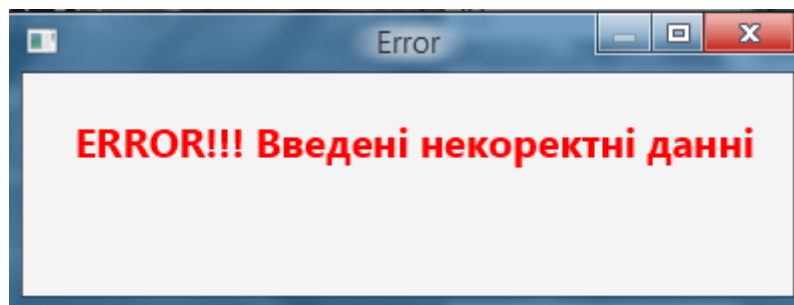


Рис. 77. Помилка

Після введення даних потрібно, натиснути кнопку «Розрахувати», після натискання справа з'явиться індикатор «Готово», це означає що програма отримала данні і готова розраховувати швидкості (рис. 78).



Рис. 78. Опція «Розрахувати»

Кнопка «Очистити» служить для очищення форм даних.

Побудова графіків

Після введення вхідних даних та їх розрахунку, може бути здійснено перехід на вкладку «Швидкість газového потоку» для розрахунку витратної, радіальної, колової складових швидкостей газového потоку.

Інтерфейс пункту «Швидкість газového потоку» (рис. 79).

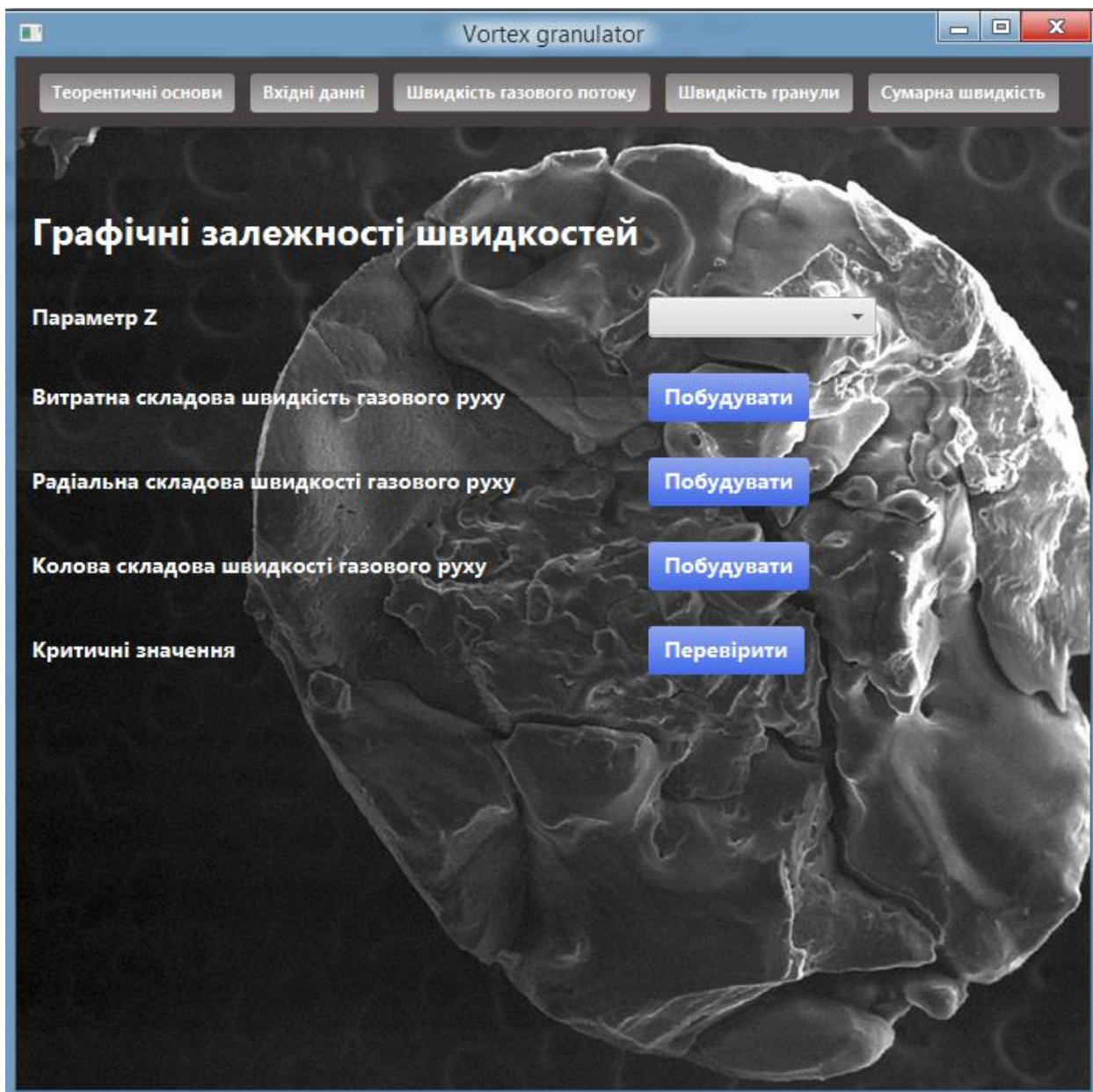


Рис. 79. Побудова графіків

Для розрахунку складових швидкостей обирається параметр Z зі списку (рис. 80).

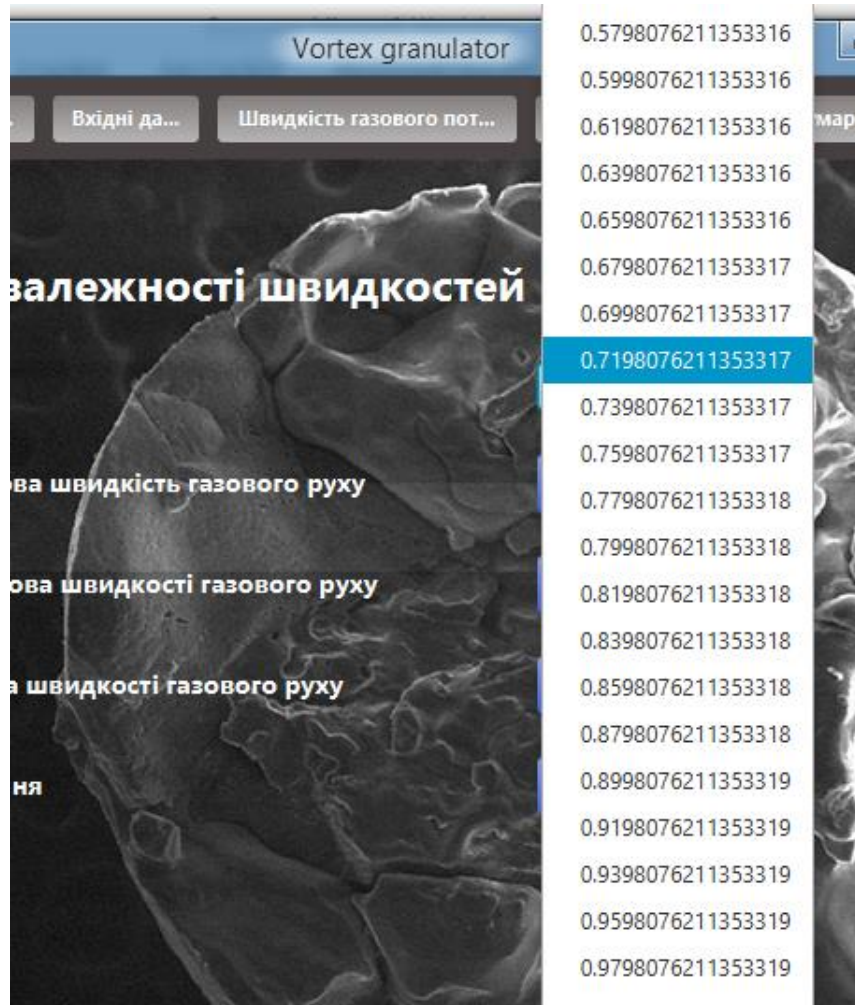


Рис. 80. Вибір параметру Z

Після обрання параметру Z в заданому діапазоні, будуються графіки та перевіряється режим зваження гранул без їх винесення з робочого простору гранулятора. Для цього потрібно натиснути кнопку «Перевірити» (рис. 81).

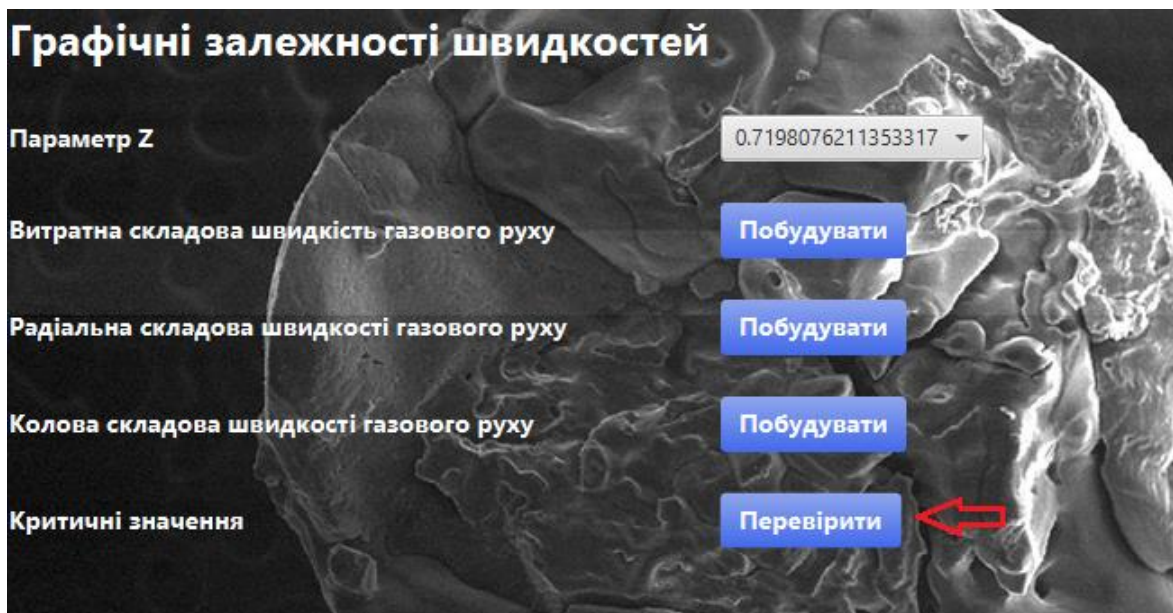


Рис. 81. Перевірка критичних значень

Якщо витратна складова швидкості руху газового потоку не забезпечує режим зваження гранул, програма видасть попередження (рис. 82).

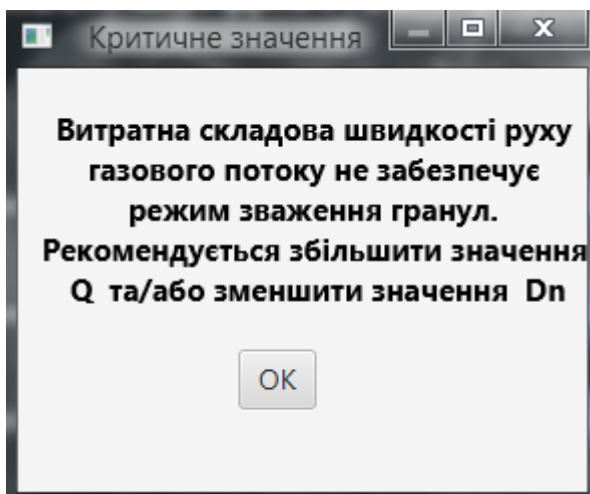


Рис. 82. Попередження

Якщо витратна складова швидкості руху газового потоку відповідає режиму винесення гранул з робочого простору гранулятора, програма видасть попередження (рис. 83).

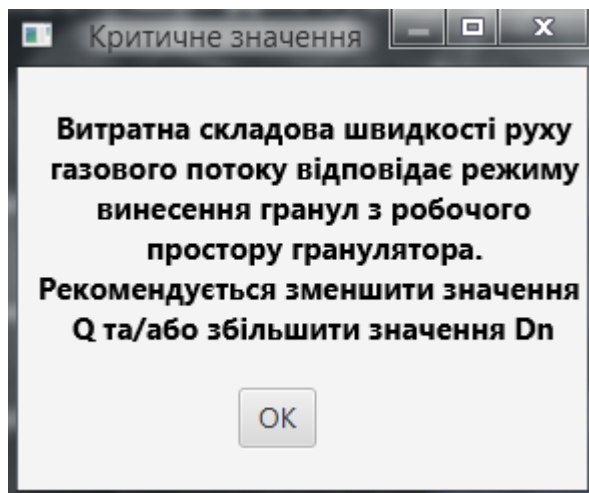


Рис. 83. Попередження 2

Якщо витратна складова швидкості руху газового потоку забезпечує режим зваження гранул без їх винесення з робочого простору гранулятора – дані введені коректно (рис. 84).

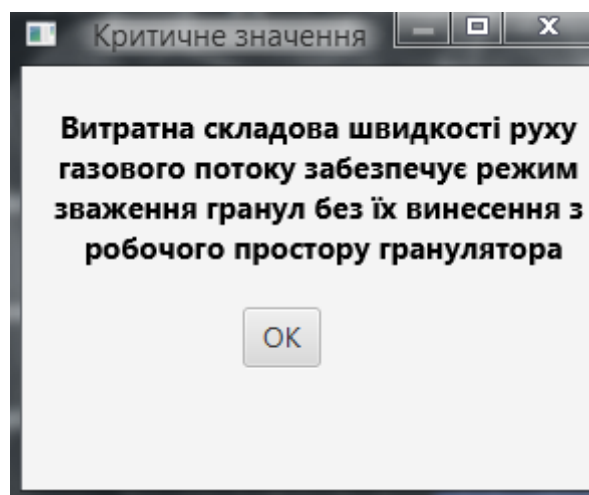


Рис. 84. Коректний вибір витратної складової швидкості руху газового потоку

Для побудови графіків складових швидкостей натискаємо на кнопку «Побудувати».

В результаті програма покаже графічні залежності (рис. 85).

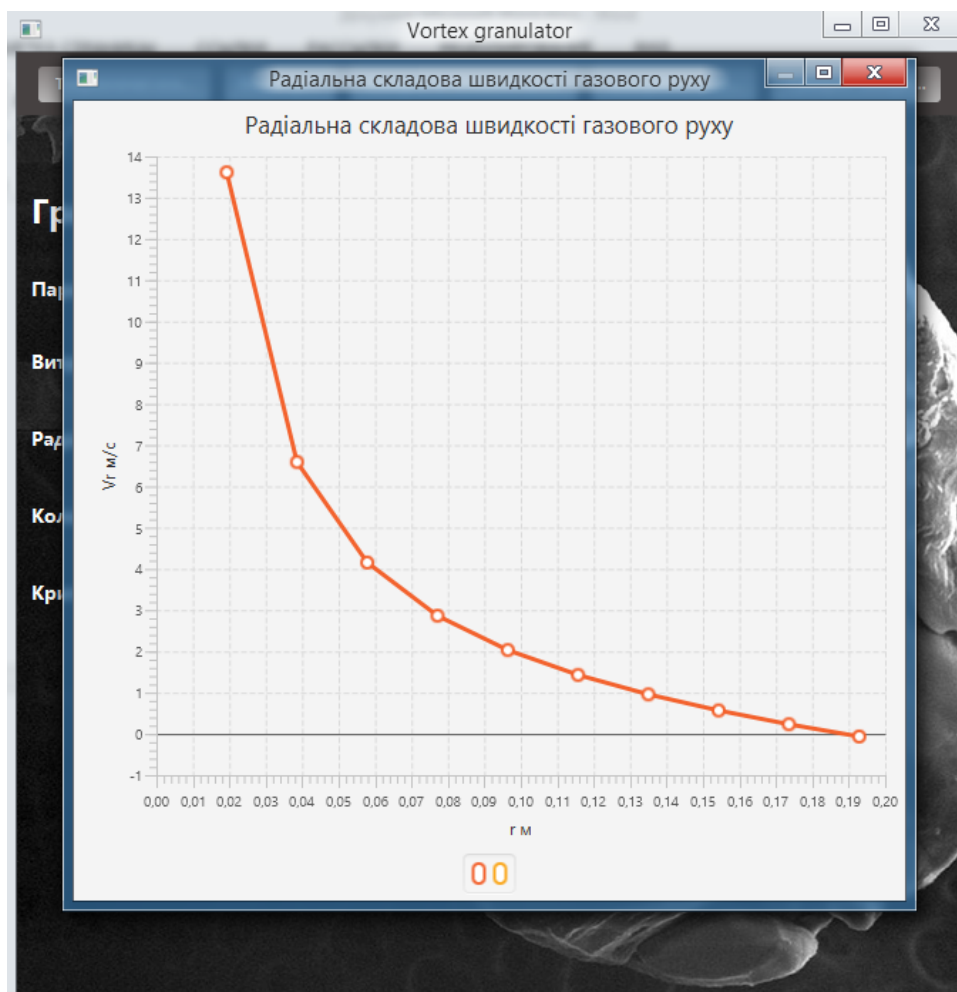


Рис. 85. Виведення графіків

Побудова графіків швидкості гранул та сумарної швидкості ґрунтується на такому ж принципі.

Можливі помилки та їх виправлення

Якщо у комбобоксі немає значень, то в меню «Вхідні данні» не була натиснута кнопка «розрахувати» (рис. 86).



Рис. 86. Відсутність значень для розрахунку

Якщо при натисканні кнопок «Побудувати» або «Перевірити», нічого не відбувається, то не обраний параметр Z (рис. 87).

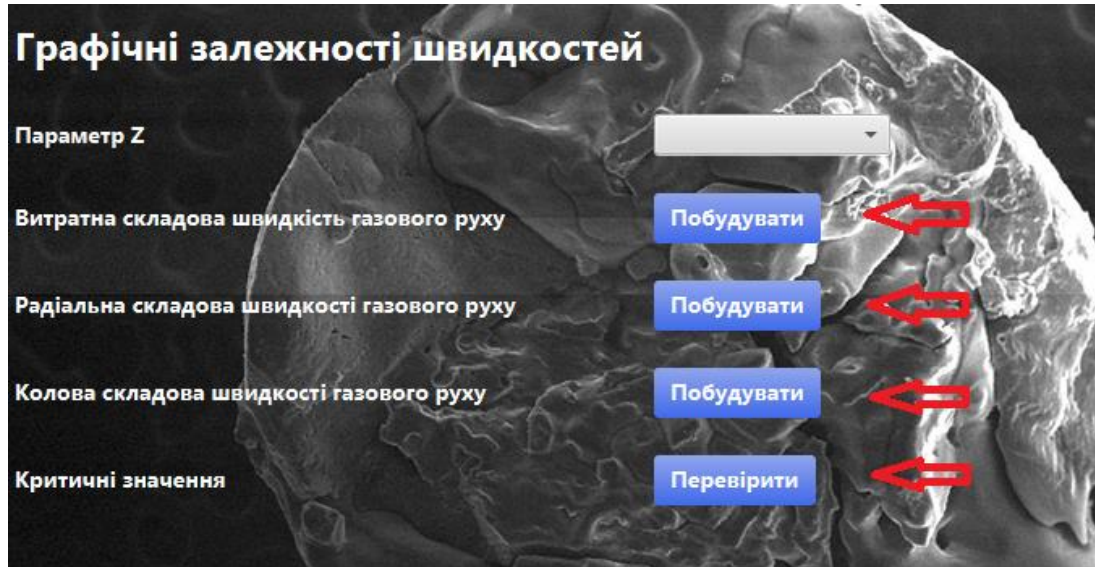


Рис. 87. Недостатність обраних даних

8.3 Керівництво користувача програми *Classification in vortex flow*

Програма призначена для розрахунку швидкості газового потоку, геометрії робочого простору, маси і кінетики прогріву та візуалізацію отриманих значень у вигляді графічних залежностей.

Головна сторінка програми має такий вигляд (рис. 88).

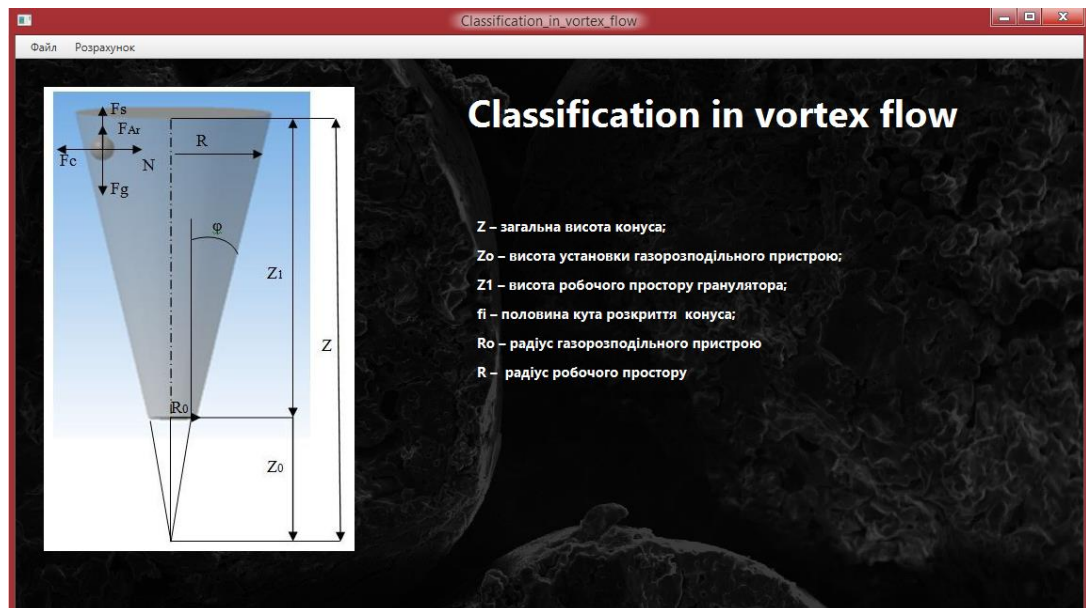


Рис. 88. Головна сторінка програми

Швидкість газового потоку

Цей пункт меню містить схему робочого простору гранулятора та розраховує такі величини як: маса сухої гранули, маса вологої гранули, стан рівноваги сухої гранули та стан рівноваги вологої гранули (рис. 89). Для розрахунку введіть значення та натисніть кнопку «Розрахувати». Також програма має можливість згенерувати excel документ з отриманими значеннями. Для цього натисніть кнопку «Зберегти Excel».



Рис. 89. Швидкість газового потоку

Геометрія робочого простору

Розрахунок при змінній витраті повітря

Розраховується значення висоти робочого простору при змінній витраті повітря сухої та вологої гранули та виводить графічні залежності по висоті та радіусу гранулятора (рис. 90). Розрахунок залежить від параметру Q (витрата повітря). Користувач задає значення Q_{min} , Q_{max} , $delQ$ та інші вхідні параметри і програма будує графіки. Також є можливість згенерувати документ у форматі excel.

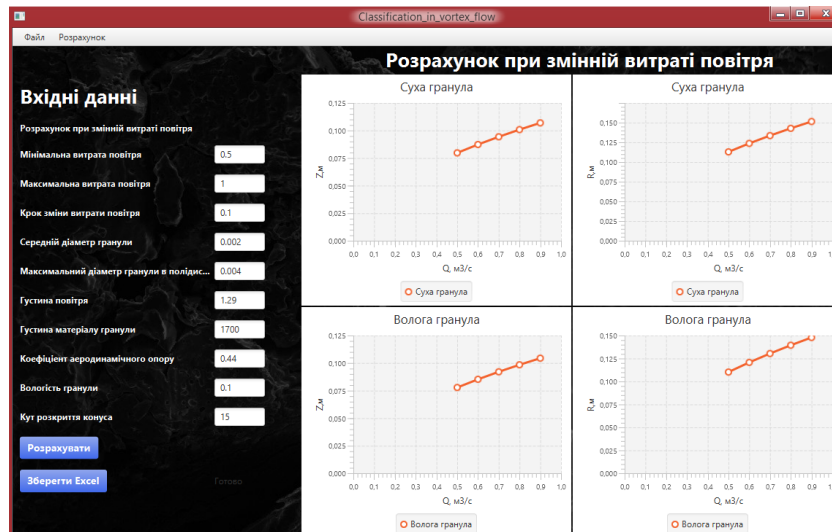


Рис. 90. Розрахунок висоти робочого простору при змінній витраті повітря
Розрахунок при змінному куті розкриття конуса

Розраховується значення висоти робочого простору при змінному розкритті конуса сухої та вологої гранули та виводить графічні залежності по радіусу гранулятора (рис. 91). Розрахунок залежить від параметру β (кут розкриття конуса). Користувач задає значення β_{\min} , β_{\max} , $\Delta\beta$ та інші вхідні параметри і програма будує графіки. Також є можливість згенерувати документ у форматі excel.

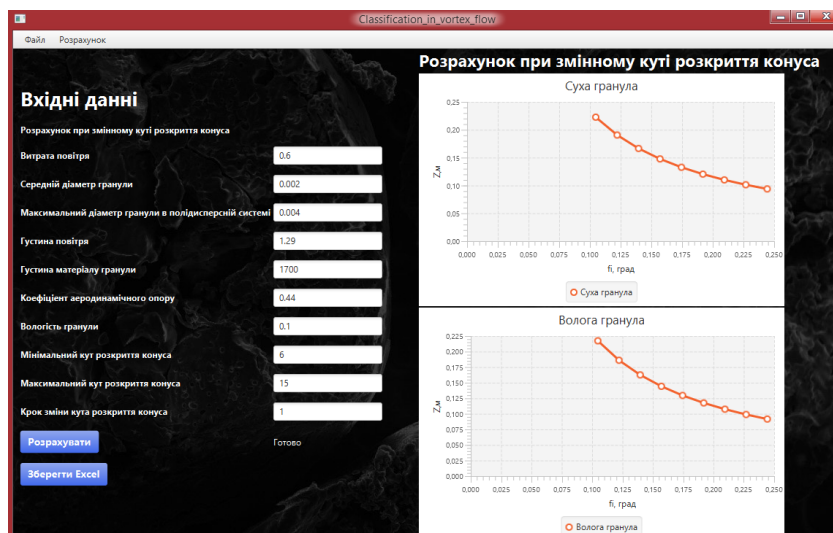


Рис. 91. Розрахунок висоти робочого простору при змінному куті розкриття конуса

Розрахунок розподілу гранул по фракціям.

Програма розраховує значення висоти робочого простору по фракціям (рис. 92) та візуалізує їх у вигляді графічної моделі. Розрахунок ведеться та сухих та вологих гранул. Для того, щоб обчислити значення, потрібно натиснути на кнопку «Розрахувати», а потім вибрати обрати варіант розрахунку – для сухої або вологої гранули. Також є можливість зберегти данні в форматі excel.

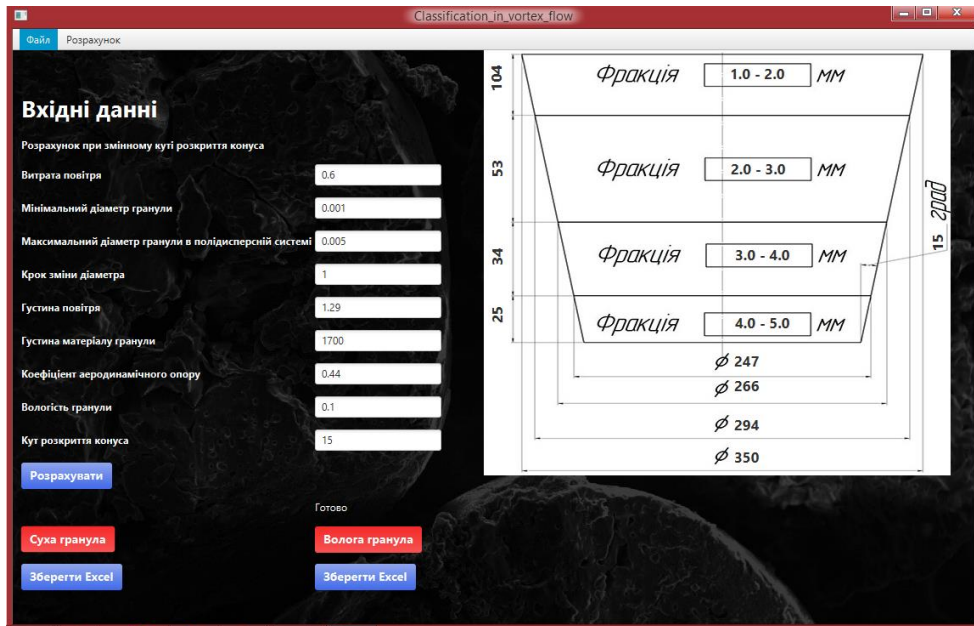


Рис. 92. Розрахунок висоти робочого простору по фракціям

Розрахунок маси гранули та кінетики її прогріву.

Розрахунок маси гранули

Програма розраховує масу гранули в залежності за часом сушіння (рис 93).

При розв'язку даного рівняння був використаний метод Сімпсона.

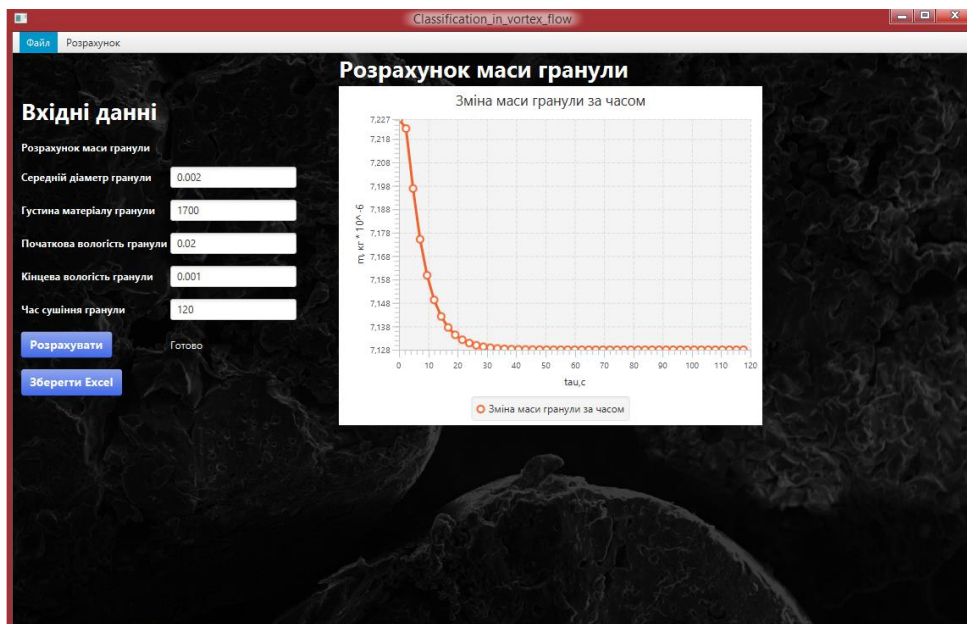


Рис. 93. Розрахунок маси гранули

Розрахунок кінетики прогріву гранули (розподіл по радіусу).

Програма розраховує кінетику прогріву гранули в залежності від радіусу (рис. 94).

Програма обчислює збіжний ряд поки різниця між $k+1$ та k ітерацією буде менше ніж задана точність. Для розрахунку введіть данні та натисніть на кнопку «Розрахувати». Є можливість зберегти данні в excel.

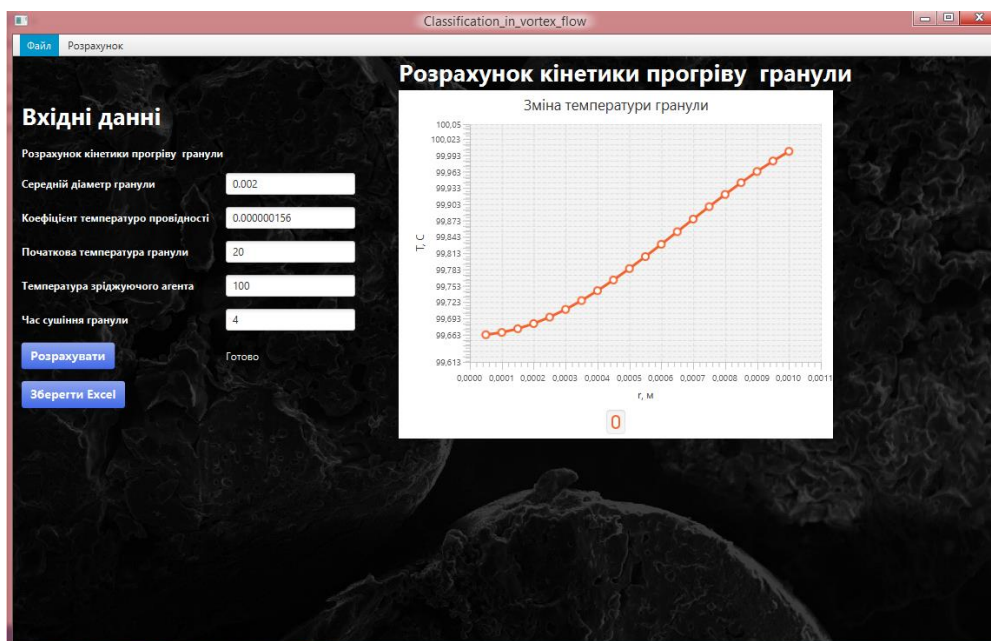


Рис. 94. Розрахунок кінетики прогріву гранули (розподіл по радіусу)

Розрахунок кінетики прогріву гранули (розподіл по часу сушіння).

Програма розраховує кінетику прогріву гранули в залежності від часу сушіння (рис. 95).

Програма обчислює збіжний ряд поки різниця між $k+1$ та k ітерацією буде менше ніж задана точність. Для розрахунку введіть данні та натисніть на кнопку «Розрахувати». Є можливість зберегти данні в excel.

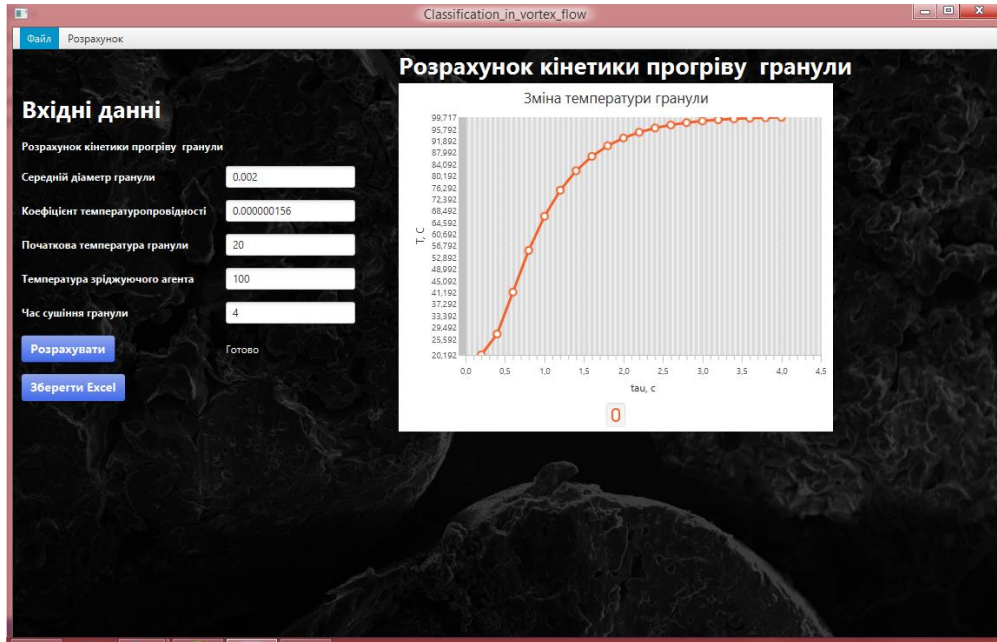


Рис. 95. Розрахунок кінетики прогріву гранули (розподіл по часу сушіння)

9 ПРОТОКОЛИ ПРОВЕДЕННЯ ВИПРОБУВАНЬ ДОСЛІДНОГО ЗРАЗКА ВИХРОВОГО ГРАНУЛЯТОРА З ОТРИМАННЯ ГРАНУЛ ПАС ТА ДОСЛІДЖЕННЯ ПОКАЗНИКІВ ЯКОСТІ ПАС

9.1 Компонування обладнання грануляційного модуля

При розміщенні обладнання необхідно враховувати такі технологічні вимоги: зручність обслуговування обладнання та можливість демонтажу апаратів та їх деталей під час ремонтів; забезпечення максимально коротких трубопроводів між апаратами; раціональне рішення внутрішньозаводського транспорту. При цьому слід дотримуватися будівельних норм, вимог природної освітленості, правил і норм з техніки безпеки та охорони праці, санітарних та протипожежних норм.

При виборі варіанта компоновки технологічного обладнання необхідно враховувати особливості технологічного процесу властивості вихідної сировини і продукту виробництва.

Пориста аміачна селітра відрізняється великою гігроскопічністю (здатністю поглинати вологу з повітря), що є однією з причин її злиття. Під наглядом аміачної селітри зазвичай розуміють втрату її сипкості при зберіганні. Чиста аміачна селітра внаслідок високої гігроскопічності здатна до злиття при зберіганні внаслідок значної зміни її розчинності та модифікаційних перетворень при температурних перепадах. Одночасно зменшується міцність гранул. Тому основне та допоміжне технологічне обладнання для проведення процесу грануляції буде розміщено в закритому приміщенні, що забезпечить його ізоляцію від впливу атмосферних опадів.

Для забезпечення транспортування сипких матеріалів без застосування додаткового обладнання та створення нормальних умов протікання процесу охолодження отриманих гранул аміачної селітри технологічне обладнання буде розташоване у два яруси один над одним.

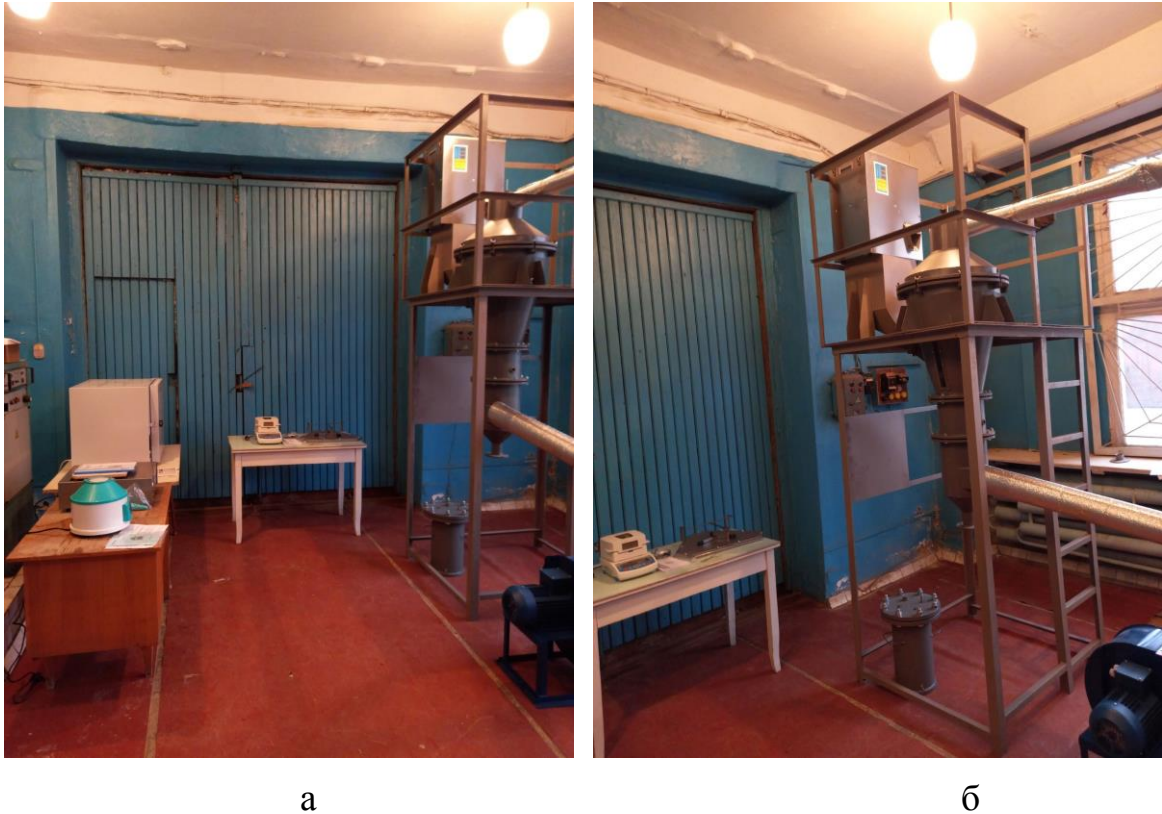


Рис. 96. Грануляційний модуль: а – обладнання для тестування гранул ПАС; б – дослідний зразок вихрового гранулятора із допоміжним обладнанням

9.2 Визначення гідравлічного опору та режимів роботи вихрового гранулятора

Основні гідродинамічні характеристики зваженого шару будь-якої конфігурації – перепад тиску у зваженому шарі (гідравлічний опір зваженого шару) ΔP , перша критична швидкість (швидкість газу, яка відповідає переходу дисперсного матеріалу у зважений стан) w_1 , друга критична швидкість (швидкість газу, яка відповідає умовам винесення дисперсного матеріалу зі зваженого шару і подальшого його пневмотранспорту) w_2 , а також однорідність зваженого шару.

Яскраво виражений перехід нерухомого шару дисперсного матеріалу у зважений шар характерний лише для монодисперсних систем або систем з вузьким фракційним складом. У випадку зважування полідисперсної системи

вона характеризується областю перших критичних швидкостей, в якій відбувається перехід від фільтрування до власне рухомого шару.

При плавному збільшенні швидкості руху газового потоку шар твердої дисперсної фази змінює свою порізність, при цьому відбувається зміна фізичної картини взаємодії потоків. Процес фільтрування газового потоку крізь нерухомий шар змінюється створенням двофазної рухомої системи зі значенням порізності більше 0,4.

Верхню межу існування киплячого шару часто пов'язують з поняттям швидкості витання частинок, при якій починається масове винесення частинок даного розміру, форми, густини, шорсткості та інших фізичних параметрів.

Перехід дисперсного матеріалу у стан зваженого шару відбувається за умови врівноваження ваги дисперсного матеріалу (рівнодіюча сили тяжіння та сили Архімеда) гідравлічним опором зваженого шару (зумовлений силою аеродинамічного опору газового потоку руху дисперсної фази):

$$\Delta P = \frac{G_w}{S_p} \quad (86)$$

де G_w – вага матеріалу шару, S_p – поперечний переріз апарату на рівні газорозподільного пристрою,
або

$$\Delta P = g(\rho_c - \rho_g)(1 - \varepsilon_{36})h_{36}, \quad (87)$$

де ρ_c – густина дисперсної фази, ρ_g – густина газу, ε_{36}, h_{36} – відповідно порізність та висота шару в момент переходу у зважений стан.

Цьому стану відповідає конкретне значення w_1 , методика обчислення якої буде наведена нижче.

Залежність $\Delta P = f(w)$ має різний характер у випадку функціонування ідеального зваженого шару, зваженого шару з монофракційним і поліфракційним складом, вихрового зваженого шару. Характерні якісні залежності для вказаних вище випадків наведено на рис. 97.

Лінія ідеального зваження дисперсного матеріалу (рис. 97, а) складається з кількох ділянок. Висхідна ділянка характеризує режим фільтрування зріджуючого агента крізь шар дисперсного матеріалу. Характер лінії цієї ділянки може відрізнитись: у разі ламінарного режиму руху газового потоку це пряма ($\Delta P \sim w$), у разі турбулентного – парабола ($\Delta P \sim w^2$). На лінії зваження спостерігається чіткий перехід від нерухомого до зваженого шару матеріалу, який характеризується швидкістю руху газового потоку w_1 (т.В). В стані зваження лінія гідравлічного опору паралельна горизонтальній вісі, опір шару дисперсного матеріалу зберігає практично постійне значення ($\Delta P = \text{const}$). В момент початку винесення дисперсної фази зі зваженого шару ця система характеризується значенням швидкості руху газового потоку w_2 (т.Д). Після досягнення критичної швидкості w_2 гідравлічний опір зваженого шару поступово зменшується і відповідає значенню гідравлічного опору лише газового потоку (т.Е). Зображена на рис. 0, а лінія зваження характерна лише для гладких сухих монодисперсних частинок сферичної форми.

Вигляд реальних ліній зваження представлений на рис. 97, б, в. У разі наявності сил зчеплення між частинками дисперсної фази у зваженому шарі спостерігається сплеск (гістерезис) гідравлічного опору з піком в т.А (рис. 97, в). Природа цього явища пояснюється дією вказаних вище сил, внаслідок чого перепад тиску безпосередньо перед початком зваження дисперсного матеріалу дещо більший, ніж власне у режимі зваження. У випадку зменшення швидкості руху газового потоку та поступового переходу рухомого шару дисперсного матеріалу у нерухомий явища гістерезисну не спостерігається. Це пояснюється тим, що після завершення зваження матеріалу його порізність дещо вища за початкову і при поверненні до режиму зваженого шару висхідна частина лінії відповідає зображеній на рис. 97, б. Для реальних режимів зваження дисперсного матеріалу характерна наявність швидкості руху газового потоку w_0 . Вона відповідає переходу нерухомого шару дисперсного матеріалу в рухомий, а не

завжди зважений. Для полідисперсного матеріалу наявність діапазону початку зважування w_0-w_1 зумовлений тим, що для різних фракцій величина першої критичної швидкості руху газового потоку є різною. Тому при значенні w_0 окремі (дрібні) фракції переходять у зважений стан, а інші (більш крупні) фракції починають лише рухатись.

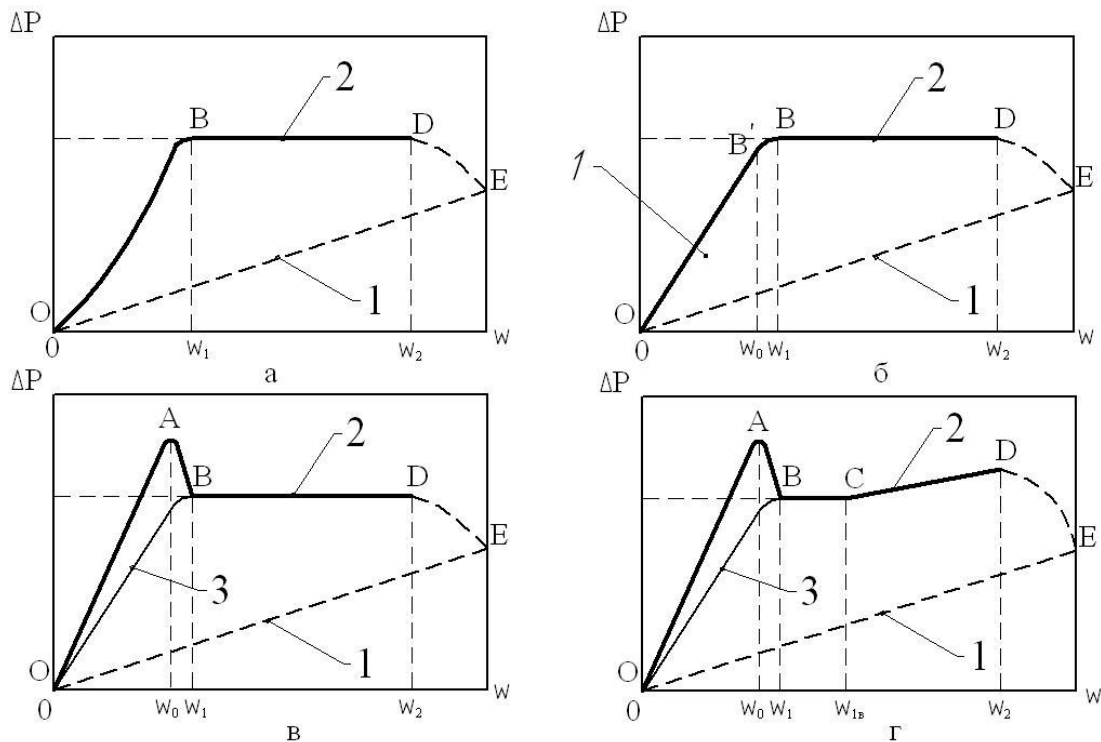


Рис. 97. Залежності $\Delta P=f(w)$ для різних видів зваженого шару: а – лінія ідеального зваження; б – лінія реального зваження полідисперсної системи; в – лінія реального зваження з гістерезисом; г – лінія реального зваження вихрового зваженого шару; 1 – лінія опору газового потоку; 2 – лінія опору зваженого шару; 3 – гілка опору при повторному переході матеріалу у зважений стан; w_0 – швидкість руху газового потоку, яка відповідає переходу шару дисперсного матеріалу з нерухомого в рухомий стан (перша критична швидкість для мінімального розміру фракції в поліфракційній системі) w_1 – перша критична швидкість; w_2 – друга критична швидкість.

Зображена на рис.97, г лінія зваження описує еволюцію зміни гідравлічного опору вихрового зваженого шару. Особливість процесу зваження у

вихровому газовому потоці – наявність області підвищення гідравлічного опору по мірі зміни конфігурації зваженого шару від пухирцевої до вихрової.

Мінімальний гідравлічний опір зваженого шару обирається за умови забезпечення рівномірного зваження та має вигляд відношення опору газорозподільного пристрою ΔP_{ep} до опору зваженого шару ΔP . Це відношення представлено у вигляді залежності:

$$\frac{\Delta P_p}{\Delta P_c} = \frac{r-1}{2(k-1)(r+1)} \quad (88)$$

Величини k і r характеризують нерівномірність швидкості руху газового потоку – зріджуючого агента, і висоти псевдозрідженого шару. Для зваження тонких шарів рекомендується дотримуватися умови $\frac{\Delta P_{ep}}{\Delta P} \approx 1$.

Окремими вченими проводяться дослідження з визначення гідравлічного опору вихрового зваженого шару. При зваженні в полі відцентрових сил рекомендується для визначення опору шару наступне співвідношення:

$$\Delta P = \frac{V_r^2 M_w}{2\pi g B_p} \quad (89)$$

де V_r – радіальна складова швидкості руху газового потоку; M_w - маса зваженого шару; B_p – ширина решітки, м.

Експериментальна перевірка вищенаведеного співвідношення показала досить значне розходження (до 25%), фактично це співвідношення можна застосовувати для орієнтовної оцінки.

Для підтримання зваженого шару в стані дисперсної фази потрібен безперервний обмін енергією між ним та газовим потоком (зріджуючим агентом). Енергія, яка переходить від газового потоку до шару дисперсної фази, витрачається на подолання сил тертя між фазами та стінкою апарату і розширення шару.

Зважений шар існує в межах швидкості руху газового потоку w_1 і w_2 та характеризується різною інтенсивністю. На практиці стан шару дисперсного

матеріалу у режимі зваження характеризується параметром, який має назву число псевдозрідження

$$K_w = \frac{w_p}{w_l} \quad (90)$$

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

Величину K_w наразі визначено для систем з класичним зваженим шаром; для випадку вихрового зваженого шару дані по величині K_w відсутні.

Ряд залежностей, які одержано на базі рівнянь для розрахунку гідравлічного опору зваженого шару, лягли в основу обчислення першої критичної швидкості. Ця швидкість є найбільш важливим параметром зваженого шару. Залежно від значення першої критичної швидкості для дисперсної фази різного розміру та (або) маси визначаються оптимальні конструктивні характеристики грануляторів та їх потужність за гранульованим продуктом.

Швидкість руху газового потоку, яка відповідає початку зваження шару, який складається із частинок, форма яких близька до сферичної, може визначатися по формулі:

$$Re_{min} = \frac{Ar}{150 \frac{1-\varepsilon_0}{\varepsilon_0^3} + \sqrt{\frac{1,75}{\varepsilon_0^3}} \sqrt{Ar}} \quad (91)$$

За умови $\varepsilon_0 = 0,4$, отримується відома формула

$$Re_{кр1} = \frac{Ar}{1400 + 5,22\sqrt{Ar}} \quad (92)$$

З формули (92) визначається шукане значення w_l .

9.3 Методика визначення показників якості ПАС

Вологість зразків ПАС

Внаслідок того, що аміачна селітра дуже гігроскопічна та спочатку має якусь кількість вологи, що залежить від вологості навколишнього середовища,

гранули аміачної селітри піддавалися сушінню доти, поки не припинялося зниження їх маси. Потім гранули поміщалися в герметичну ємність, у якій вони остигали. Далі навішення гранульованої аміачної селітри зволожувалося до заданої концентрації й поміщалося в установку на ваги, де піддавалося сушінню. Сушіння тривало доти, поки із гранул не вийде вся введена в них волога.

Дослідження проводилися при температурах в апарату 125–135 °С і початковому вологовмісті гранул, що задається з точністю 0,5 % мас. у діапазоні 1 – 3 % мас. У процесі сушіння фіксувалися показання часу від початку експерименту з точністю до 1 сек. доти поки гранули повністю не висохнуть, і маси матеріалу, що висушується, з точністю 0,01 гр.

Концентрація сухої речовини в гранулі в будь-який момент часу сушіння виражена у відсотках, визначається як відношення початкової маси гранул (до зволоження) до маси гранул у будь-який момент часу сушіння:

$$x = \frac{m}{m_{\Gamma}} \cdot 100, \quad (93)$$

де m – початкова маса гранул (до зволоження), гр; m_{Γ} – маса гранул у будь-який момент часу сушіння, гр.

Для визначення вологовмісту вираження (94) слід записати у вигляді:

$$W = 100 - \left(\frac{m}{m_{\Gamma}} \cdot 100 \right). \quad (94)$$

Поглиняльна (вбираюча) здатність зразків ПАС

Одним з основних показників, що характеризують якість пористої гранульованої аміачної селітри, є вбираюча здатність гранул стосовно рідкого палива (наприклад, солярного масла). Цей показник виражається числом грамів, що може поглинути 100 г гранул (г/100 г). Він визначається за методикою, передбаченої ТУ 6-03-372-74 на гранульовану пористу аміачну селітру марки «П».

Навіска близько 100 г аміачної селітри, попередньо відсіяної від дрібних фракцій через сито з отворами 0,5 мм і зваженої з точністю до 0,01 г, через скляну лійку засипали в чисту суху бюретку із краном, установлену в штативі у вертикальному положенні. Перед досвідом у бюретку опускали 5 - 6 найбільш великих гранул селітри для запобігання закупорювання отвору в крані дрібними гранулами. Потім засипали інше навішення. У скляному стаканчику відважували 50 г солярного масла з точністю до 0,01 г, що потім без втрат переносили в бюретку, заповнену навішенням аміачної селітри, і спостерігали, щоб масло рівномірно змочувало всі гранули селітри по висоті бюретки й верхній рівень його був вище рівня селітри на 3 - 4 см.

Стаканчик із солярним маслом, що залишилося, ставили під краном бюретки. Просочення гранул селітри солярним маслом у бюретці при закритому її крані тривали 20 хв, після чого кран бюретки відкривали й залишали на 1,5 год вільно стікати масло, що не вбралося в гранули. Потім кран бюретки закривався й удруге зважувався скляний стаканчик з маслом.

Виражена у відсотках різниця маси масла в стаканчику до й після досвіду приймається за величину, що характеризує вбираючу здатність гранульованої аміачної селітри.

$$BC = \frac{m_{MH} - m_{MK}}{m_{MH}} \cdot 100, \quad (95)$$

де m_{MH} – маса масла до досвіду; m_{MK} – маса масла після досвіду.

Показником якості продукту є також величина, що виражає пористість гранул, що приблизно визначається об'ємним методом [45].

У бюретку на 25 мл, постачену краном, наливали певний об'єм криоскопічного бензолу (V_1). Потім у неї всипали приблизно 10 г селітри й через 1 — 2 хв фіксували об'єм, що змінився в бюретці (V_2). Потім відкривався кран, спускався бензол, що перебуває між гранулами селітри, у другу бюретку й заміряли його об'єм (V_3). Пористість в % обчислювалася по формулі:

$$P = \frac{V_1 - V_3}{V_2 - V_3} \cdot 100. \quad (96)$$

Цим методом фіксувалися тільки відкриті пори, у які може проникнути рідке паливо.

Утримувальна здатність зразків ПАС

Метод Нітро Мака.

Принцип: заздалегідь зважена проба змішується з попередньо зваженим маслом. Отриману суміш центрифугують. Олія, виділена після центрифугування, зважується.

Прилади:

1. Центрифуга СМ-3 MICROMED.
2. Центрифугувальна трубка з двома відділеннями (перше відділення має перфороване дно, друге із суцільним дном).
3. Склянка для змішування проби з солярною олією.
4. Олія (дизельне паливо ГОСТ 305-82).

Процедура аналізу:

Зважується друге відділення центрифугувальної трубки. Зважується 6 г зразка (аміачна селітра) та 2 г дизельного палива, все поміщається у склянку, де протягом 5 хв перемішується за допомогою тонкого металевого дроту. Отриману суміш відстоюють 10 хв, і весь вміст склянки вивантажується в перше відділення центрифугувальної трубки. У зібраному вигляді центрифугувальну трубку поміщають центрифугу і центрифугують протягом 10 хв при 1500 об/хв. Після закінчення процесу зважується друге відділення центрифугувальної трубки та визначається маса дизельного палива.

Міцність зразків ПАС

Визначення механічної міцності гранул на роздавлювання здійснюється за допомогою екстензометра ИПГ-1 або приладу типу МИП-10-1, що забезпечують вимірювання міцності в діапазоні 0 - 1500 г на гранулу при швидкості підвищення навантаження не більше 1,5 мм/с за ДСТ 2-85. На рис. 97 показана схема приладу,

широко застосовувана для визначення міцності гранул аміачної селітри. Прилад складається із циферблатних торговельних ваг марки ВТЦ-10 типу ВНЦ (граничне навантаження 10 кг, ціна розподілу шкали 5 г) і мікропреса. Пристрій мікропреса показаний на рис. 98. Поверхня поршня й підставки відполірована. Поршень 6 пересувається по вертикалі нагору й вниз обертанням гвинта 1, що забезпечує зміну навантаження на випробовувану гранулу.

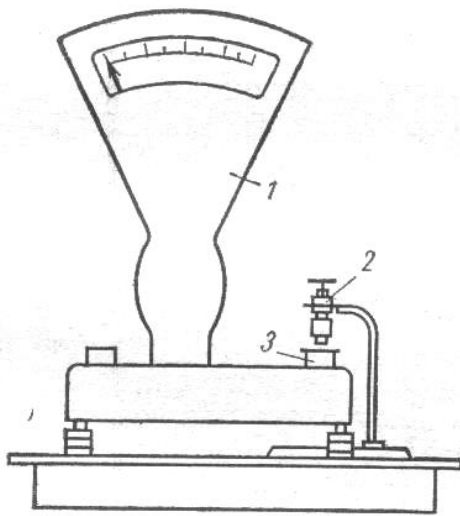


Рис. 98. Загальний вид приладу для визначення міцності гранул: 1 – ваги циферблатні; 2 – ручний прес; 3 – ставка.

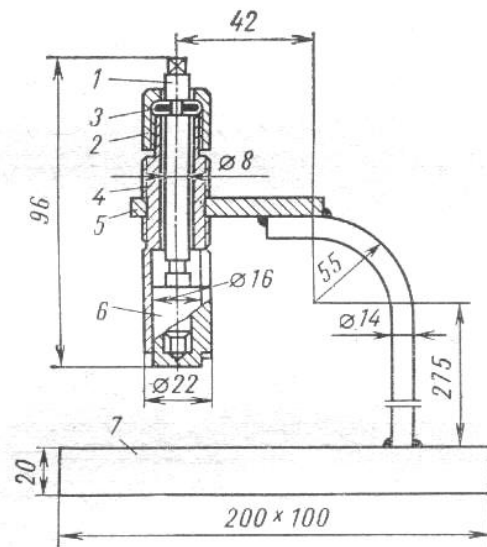


Рис. 99. Мікропрес для раздавлювання гранул: 1 – гвинт; 2 – накидна гайка; 3 – “сухар”; 4 – корпус; 5 – фланець; 6 – поршень; 7 – станина.

Пробу селітри витримували при кімнатній температурі в закритій ємності протягом 12 годин. Для випробування відсівали 20 - 30 г гранул від 2 до 3 мм. Від кожної проби пінцетом відбирали по 20 гранул, можливо близьких по розмірі й формі, і поміщали в скляні бюкси із притертими кришками. Потім гранули послідовно переносили на прилад і визначали зусилля, необхідне для руйнування кожної гранули.

Механічна міцність гранул X у грамах на гранулу обчислюється по формулі:

$$X = \frac{P_1 + P_2 + P_3 + \dots + P_{20}}{20}, \quad (96)$$

де $P_1, P_2, P_3 \dots P_{20}$ – величина зусиль роздавлювання гранул, м.

9.3 Показники якості ПАС

У таблицях 2 і 3 (на додаток до проведених раніше в рамках цієї роботи досліджень, що відображені в таблиці 1) представлені результати вимірювання та розрахунку кількісних показників (властивостей гранули) залежно від гідродинамічного режиму, в якому вони отримані, та способу зволоження.

Таблиця 2. Вплив гідродинамічного режиму на структуру та якість гранул (зволожувач - розчин аміачної селітри)

Гідродинамічний режим	Міцність, кг / гранулу	Поглиняльна здатність, %	Утримувальна здатність, %	Відносна площа пористо поверхні, %	Відносна глибина пористого шару, глибина шару / радіус гранули
I – Фільтрування газового потоку крізь стаціонарний шар	0,45	8	5,3	38	≈0,1
II – початок переміщення шару	0,45	9	6,5	54	0,1-0,15
III – частково зважений шар	0,44	9,2	7	60	0,15-0,2
IV – розвинений зважений шар з частковим його закручуванням	0,42	9,5	7,8	74	≈0,2
V – розвинений вихровий зважений шар	0,4	11,4	8,7	84	0,2-0,32

Таблиця 3. Вплив способу зволоження на структуру і якість гранул (зволожувач – аміачна селітра)

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
Зволоження за способом, запропонованим в даній роботі	0,4	8,3	9,6	91	0,3-0,4

ВИСНОВКИ

На основі виконаної роботи були отримані наступні *наукові результати*:

- аналіз методів отримання ПАС показав певні недоліки існуючих способів, які негативно впливають на якість пористої структури гранул, ступінь монодисперсності гранул, їх міцність а інші специфічні особливості;

- існуючі грануляційні пристрої призначені здебільшого для великотоннажних виробництв (грануляційні вежі), а с умовах середньотонажних та дрібнотонажних виробництв існує дефіцит в високоефективному обладнанні;

- запропоновано комбінацію методів зволоження та термообробки гранул рядової аміачної селітри у грануляторах із використанням вихрових потоків;

- застосування вихрових потоків в грануляторах із псевдозрідженим шаром дисперсного матеріалу дозволяє стабілізувати нерівномірності в розподілі гранул в об'ємі псевдозрідженого шару та застосувати механізми управління рухом гранул в направленому псевдозрідженому шарі.

- результати розрахунку гідродинамічних характеристик руху потоків у робочому просторі вихрового гранулятора дозволили виділити основні зони вихрового та висхідного руху газового потоку, базуючись на отриманих даних полів швидкостей та тисків. На основі отриманих даних визначається сумарна швидкість руху газового потоку та переважаючий його напрям у довільно обраній точці вихрового гранулятора;

- гранула у вихровому грануляторі збільшується, підпорядковуючись теорії рівномірно-поверхневого росту. Зважаючи на можливість організації направленого нанесення плівки розчину на гранулу, можливість класифікації гранул за розмірами, а також з урахуванням того, що в процесі нанесення плівки на поверхню рядової аміачної селітри не відбувається агломерація, стирання тощо, процес нанесення плівки на гранулу буде відбуватись без вторинних явищ;

- в результатів дослідження фазового складу різних зразків аміачної селітри показано, що всі зразки ПАС не зазнають хімічних перетворень;

- за результатами вивчення морфології поверхні гранули показано, що

оптимальним зволожувачем є розчин аміачної селітри з часом його сушіння до 6 хвилин і одноразовим циклом термообробки. Показником якості структури є розвинена мережа глибоких звивистих нанопор;

- структура гранул рядової аміачної селітри володіє певною пористістю, однак, це в більшості «механічні» пори (наслідок температурних напружень);

- термообробка гранул практично не впливає на утворення нанопор на поверхні. Практично термообробка призводить до зміни модифікації гранули до зменшення її густини внаслідок «розпушення»;

- зволоження гранул рядової аміачної селітри водою покращує показники якості ПАС, але трохи зменшує міцність гранули (досягається мінімальне значення, яке вимагають нормативні документи);

- використання в якості зволожувача розчину аміачної селітри призводить до істотного поліпшення показників якості ПАС;

- застосування інших зволожувачів (із запропонованих в даній роботі, без застосування пороутворюючих добавок) у вигляді розчинів або їх суміші не призводить до поліпшення основних показників якості ПАС (поглинальна та стримувальна здатності);

- час термообробки і кількість циклів термообробки значно впливає на міцність гранули. При цьому внаслідок руйнування гранули збільшується об'єм пор, в які може надходити дизельне паливо. Однак, стримувальна здатність гранули ПАС в цьому випадку значно знижується;

- в результаті реалізації описаного методу отримання ПАС спостерігається збільшення кількості кисню в гранулі, що позитивно впливає на ефективність ПАС.

Практична значимість отриманих результатів:

- створено алгоритм інженерного розрахунку вихровго гарнулятора та запропоновано приклад розрахунку процесу отримання гранул ПАС;

- розроблено конструкторську документацію на виготовлення експериментального зразка вихрового гранулятора;

- створено комп'ютерну програму, яка дозволяє проводити розрахунок основних конструктивних розмірів вихрового гранулятора і оптимального (визначеного за даними експериментальних досліджень) режиму його роботи;

- запропоновано удосконалений пристрій для отримання гранул ПАС (вихровий гранулятор), подано заявку на отримання охоронного документу на вихровий гранулятор;

- запропоновано варіант технологічної схеми виробництва ПАС із застосуванням створеного грануляційного модуля та надано опис системи автоматизації цієї схеми.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Artyukhov A.E., Berladir K.V. Formation of the Ammonium Nitrate Nanoporous Structure in the Vortex Device with Pre-humidification of Granules / Journal of Nano- and Electronic Physics, 2020, 12(5), pp. 1–7.
2. Artyukhova N.O. Morphological features of the nanoporous structure in the ammonium nitrate granules at the final drying stage in multistage devices / Journal of Nano- and Electronic Physics, 2020, 12(4), 04036
3. Urea Casale S.A. [Електронний ресурс]. Режим доступу: <http://www.casale.ch/>.
4. Kahl Group [Електронний ресурс]. Режим доступу: <http://www.amandus-kahl-group.de>.
5. Stamicarbon [Електронний ресурс]. Режим доступу: <http://www.stamicarbon.ru>.
6. Toyo Engineering Corporation [Електронний ресурс]. Режим доступу: <http://www.toyo-eng.com>.
7. Changzhou Xianfeng Drying Equipment Company Ltd [Електронний ресурс]. Режим доступу: <http://www.xianfengdrying.tradeprince.com/>.
8. Fluid bed technology bringing ideas in motion [Електронний ресурс]. Режим доступу: <http://www.neuhaus-neotec.de>
9. Glatt Innovative Technologies for Granules and Pellets [Електронний ресурс]. Режим доступу: <http://www.glatt.com>.
10. Shanghai Pilotech Instrument Equipment Co [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://www.shpilotech.com/project/yc-03-lab-spray-granulator/?gclid=EAIaIQobChMItdfA>
11. F. Zardi. Vortex granulation: The new route to high-quality solid nitrogen fertilizers / Nitrogen & Syngas conference & exhibition, 2011, 15 p.
12. Технология вихревого слоя: реализация идей / рекламный проспект корпорации «Neuhaus Neotec» GmbH, 2014.

13. Fluidized Bed Granulation / рекламний проспект корпорації Umang Pharmatech Pvt. Ltd., 2014.
14. Huizhou Pingfang Trading Co. Ltd. [Електронний ресурс]. Режим доступу: <http://pharmach.en.alibaba.com/>.
15. Changzhou Fengqi Drying Equipment Co. Ltd. [Електронний ресурс]. Режим доступу: <http://czfengqi.en.alibaba.com/>.
16. Yixin Drying Equipment Co. Ltd. [Електронний ресурс]. Режим доступу: <http://yixindrying.en.alibaba.com/>.
17. Changzhou Xianfeng Drying Equipment Co. Ltd [Електронний ресурс]. Режим доступу: <http://www.tradekey.com/company/Changzhou-Xianfeng-Drying-Equipment-Co-Ltd-5251482.html>.
18. Changzhou Xiandao Drying Equipment Co. Ltd [Електронний ресурс]. Режим доступу: <http://www.china-dryer.com/en/index.html>.
19. Poh Mun Wong, Lai Wah Chan, Paul Wan Sia Heng. Investigation on Side-Spray Fluidized Bed Granulation with Swirling Airflow / AAPS PharmSciTech, Vol. 14, No. 1, 2013, pp. 211-221.
20. Классен П.В. Гранулирование / Классен П.В., Гришаев И.Г., Шомин И.И. – М.: Химия, 1991. – 240 с.
21. Артюхов А.Є. Промислове впровадження апаратів вихрового типу для отримання гранульованих продуктів / А.Є. Артюхов, В.І. Склабінський // Наукові праці ОНАХТ. – 2008. – Випуск 32. – С. 16–21.
22. Artyukhov A.E., Gabrusenoks J. Rossi P.C. Obtaining of the modified NH_4NO_3 granules with 3-d nanoporous structure: Impact of humidifier type on the granule's structure / Nanochemistry, Biotechnology, Nanomaterials, and Their Applications. Springer Proceedings in Physics. – 2018. – Vol. 214. – pp. 395-405.
23. Артюхов, А.Е. Опытнo-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.

24. Artyukhov A., Ivaniia A. Experimental and industrial introduction of the improved devices to generate NH_4NO_3 granules with nanoporous structure / IEEE Xplore. – 2017. – pp. 03NE10-1 - 03NE10-4.

25. Патент 112293 Україна, МПК В01J 2/16 (2006.01). Вихровий гранулятор зваженого шару / А.Є. Артюхов, В.С. Ведмедера; заявник та патентовласник Сумський державний університет. – № u201606181; заявл. 07.06.2016; опубл. 12.12.2016, Бюл. №23.

26. O. Dobrozhan, D. Kurbatov, A. Oranasyuk, H. Cheong, A. Cabot. Influence of substrate temperature on the structural and optical properties of crystalline ZnO films obtained by pulsed spray pyrolysis / Surface and Interface Analysis. - Volume 47, Issue 5. – 2015. – pp. 601-606.

27. C.J. Panchal, A.S. Oranasyuk, V.V. Kosyak, et al., J. Nano- Electron. Phys. 3 No 1, 274-301 (2011).

28. Пен Р.З. Планирование эксперимента в Statgraphics / Пен Р. З. – Красноярск: СибГТУ – Кларетианум, 2003. – 246 с.

29. Schulz H.E. Hydrodynamics – Concepts and Experiments. InTech; 2015.

30. Повх И.Л. Аэродинамический эксперимент в машиностроении / Повх И.Л. – Л.: Машиностроение, 1974. – 480 с.

31. Бэйнз А. Организация исследований в химической промышленности. Условия, цели и стратегия / Бэйнз А., Бредбери Ф., Саклинг С.; пер. с англ. В. Воронина – М.: Химия, 1974. – 336 с.

32. Ефремов Г.И. Моделирование химико-технологических процессов: учебник / Г.И. Ефремов. – М.: ООО "Научно-издательский центр «ИНФРА-М», 2016. – 255 с.

33. Грачев Ю.П., Плаксин Ю.М. Математические методы планирования экспериментов. - М.: ДеЛи. принт, 2005. -296 с.

34. Sahoo P. Probability and mathematical statistics. University of Louisville; 2013.

35. Shao J. Mathematical Statistics. Springer-Science+Business Media; 2003.

36. Rice J.A. *Mathematical Statistics and Data Analysis*. Duxbury: Thomson Brooks/Cole; 2010.

37. Artyukhov, A.E. Classification and separation of granules in vortex granulators / A.E. Artyukhov, A.S. Fursa, K.V. Moskalenko // *Chemical and Petroleum Engineering*. – 2015. – Vol. 51. – Nos. 5-6. – pp. 311-318.

38. Щукин В.К. Теплообмен и гидромеханика внутренних потоков в полях массовых сил / Щукин В.К. – М.: Машиностроение, 1980. – 240 с.

39. Artyukhov, A.E. Hydrodynamics of gas flow in small-sized vortex granulators in the production of nitrogen fertilizers / A.E. Artyukhov, V.I. Sklabinskyi // *Chemistry & chemical technology*. – 2015. – Vol.9. – No. 3. – pp. 337-342.

40. Artyukhov, A.E. Theoretical analysis of granules movement hydrodynamics in the vortex granulators of ammonium nitrate and carbamide production / A.E. Artyukhov, V.I. Sklabinskyi // *Chemistry & chemical technology*. – 2015. – Vol.9. – No. 2. – pp. 175-180.

41. Ахмедов Р.Б. Аэродинамика закрученной струи. М.: Энергия, 1977. – 238 с.

42. Stahl H. *Comparing Different Granulation Techniques* / *Pharmaceutical Technology Europe*, 2004, pp.23-33.

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. В. Кафаров, И. Дорохов, Н. Жаворонков, С. Арутюнов. Системный анализ процессов химической технологии: измельчение и смешение. – 2-е изд., пер. и доп. – Litres, 2018. – 450 с.

45. M. Yukhymenko, R. Ostroha, A. Artyukhov. Hydrodynamic and kinetic processes of the mineral fertilizer granules encapsulating in the multistage device with suspended layer, *East. Eur. J. Enterp. Technol.* 6/6 (2016) 22–28.

46. N.O. Artyukhova, J. Krmela, A.E. Artyukhov, O.B. Shandyba, O.V.

Savastru, I.I.Volk, N.S. Borozenets. Granulation unit for modification and obtaining of ammonium nitrate with nanoporous structure: the basics of calculation and design / International conference "Nanotechnology and nanomaterials" (NANO-2021), Lviv, August 25-28, 2021. - P. 318.

47. A.E. Artyukhov, I.I.Volk, J. Krmela, O.B. Shandyba, A.S. Chernenko. Technological calculation of granulation equipment for the production of ammonium nitrate with a nanoporous structure: algorithm and software implementation / International conference "Nanotechnology and nanomaterials" (NANO-2021), Lviv, August 25-28, 2021. - P. 324.

48. A. Artyukhov, I. Volk, N. Artyukhova, N. Borozenets. Ammonium Nitrate with Nanoporous Structure Production Unit: Foundations of Creation, Operation Principles, Product Quality Indicators / Proceedings of 2021 IEEE 11th International Conference on "Nanomaterials: Applications & Properties" (NAP-2021). - Article No NEE15.

49. Ivaniia A.V., Artyukhov A.E., Olkhovyk A.I., Potapov D.R. The Effect of the Intensity of Ammonium Nitrate Granules Humidification on the Quantitative and Qualitative Composition of the Final Granules Nanoporous Structure / Nanomaterials and Nanocomposites, Nanostructure Surfaces, and Their Applications. Springer Proceedings in Physics, vol. 246, p. 397-407 (2021).

Додаток 1

Акт про закінчення робіт із виготовлення і налагодження дослідного зразка для подання його до попередніх випробувань

ЗАТВЕРДЖУЮ

Ректор СумДУ

_____ В.Д. Карпуша
«___» _____ 2021 р.

АКТ

про закінчення робіт із виготовлення і налагодження дослідного зразка для подання його до попередніх випробувань

в рамках НТР

«Розроблення вихрового гранулятора для одержання гранул пористої аміачної селітри»

за договором № ДЗ/100 - 2021 від 04.03.2021 р., додатковою угодою № 1 від 27.09.2021р.

Ми, що нижче підписалися, представники Сумського державного університету проректор з наукової роботи Черноус Анатолій Миколайович, начальник науково-дослідної частини Курбатов Денис Ігорович, в.о. директора науково-дослідного інституту мінеральних добрив і пігментів Вакал Сергій Васильович, провідний науковий співробітник науково-дослідного інституту мінеральних добрив і пігментів, науковий керівник НТР Артюхов Артем Євгенович, молодший науковий співробітник науково-дослідного інституту мінеральних добрив і пігментів, матеріально-відповідальної особа Манжаров Андрій Сергійович склали цей акт про те, що внаслідок виготовлення, налагодження та лабораторних випробувань дослідного зразка вихрового гранулятора для одержання гранул пористої аміачної селітри за договором № ДЗ / 100- 2021 від 04.03.2021 р., додатковою угодою № 1 від 27.09.2021р. встановлено: дослідний зразок та робоча документація, розроблені і виготовлені відповідно до технічного завдання.

Висновок: дослідний зразок може бути поданий на попередні випробування.

Проректор з наукової роботи

Керівник НТР

_____ А.М. Черноус

_____ А.Є. Артюхов

Начальник НДЧ

_____ Д.І. Курбатов

В.о. директора НДІ МІНДІП

_____ С.В. Вакал

М.н.с. НДІ МІНДІП

_____ А.С. Манжаров