

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



ЛИТВИНЕНКО АНДРІЙ ВОЛОДИМИРОВИЧ

УДК 66.074-911.69:66.022.62(043.3)

**КЛАСИФІКАЦІЯ ТА ПНЕВМОЗБАГАЧЕННЯ СИПКИХ СУМІШЕЙ
У ГРАВІТАЦІЙНОМУ ПНЕВМОКЛАСИФІКАТОРІ**

Спеціальність 05.17.08 – процеси та обладнання хімічної технології

Автореферат
дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Суми – 2017

Дисертацією є рукопис.

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

Науковий керівник: кандидат технічних наук, доцент
Юхименко Микола Петрович,
Сумський державний університет,
доцент кафедри процесів та обладнання хімічних і
нафтопереробних виробництв.

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор
Цейтлін Мусій Абрамович,
Національний технічний університет «Харківський
політехнічний інститут», м. Харків,
професор кафедри хімічної техніки та промислової
екології

кандидат технічних наук, старший науковий
співробітник
Вакал Сергій Васильович,
ДП "Сумський державний науково-дослідний інститут
мінеральних добрив та пігментів", м. Суми,
директор

Захист відбудеться «03» березня 2017 року об 14:00 годині на засіданні спеціалізованої вченої ради К 55.051.04 у Сумському державному університеті (40007, м. Суми, вул. Римського-Корсакова, 2, ауд. Ц 204).

З дисертацією можна ознайомитися в бібліотеці Сумського державного університету (40007, м. Суми, вул. Римського-Корсакова, 2).

Автореферат розісланий «27» січня 2017 року.

Вчений секретар спеціалізованої
вченої ради К 55.051.04
кандидат технічних наук, доцент

Л.Л. Гурець

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Підвищення ефективності хімічних, тепломасообмінних, термічних, гетерогенних процесів в більшості випадків досягається використанням твердих матеріалів в порошкоподібному стані та певного гранулометричного складу. Тому у більшості технологічних ліній встановлюють класифікатори, призначення яких полягає у розділенні сипких сумішей, в більшості випадків на дві частини, з переважним вмістом дрібних чи крупних частинок. З цією метою широко використовується пневмокласифікація, яка реалізується у достатній кількості апаратів різноманітних конструкцій.

Відомі конструкції пневмокласифікаторів достатньо ефективно працюють як сепаратори для знепилення сипких сумішей при вмісті пилу у вихідному матеріалі не більше 15-20%. При розділенні бінарних сипких сумішей з рівним вмістом дрібної та крупної фракції, типові пневмокласифікатори забезпечують чистоту отриманих фракцій не більше як 70-75%. Але існують технології, які потребують отримання чистих продуктів розділення, відповідно вимогам технічних умов не менше як 95%.

Тому необхідною є розробка нових конструкцій апаратів з принципово іншою організацією процесу пневмокласифікації та пневмозбагачення сипких сумішей з метою отримання чистих продуктів розділення, а задача моделювання процесів розділення у гравітаційному пневмокласифікаторі постає актуальною, і розв'язує конкретне наукове завдання, що має істотне значення для процесів та обладнання хімічної технології.

У зв'язку з цим можна стверджувати, що тема дисертаційної роботи є актуальною, має важливе наукове та практичне значення, оскільки вирішує наукове завдання, спрямоване на моделювання процесів пневмокласифікації та пневмозбагачення сипких сумішей і удосконалення науково-обґрунтованих методів розрахунку основних технологічних параметрів та характеристик пневматичних класифікаторів.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами

Дисертаційна робота відповідає тематичному плану науково-дослідних робіт кафедри процесів та обладнання хімічних і нафтопереробних виробництв (ПОХНВ) Сумського державного університету в рамках держбюджетної тематики «Розробка та дослідження високоефективних апаратів для процесів масообміну, кристалізації та класифікації» (номер державної реєстрації 0110U001953), термін виконання – 2010–2014 рр., а також держбюджетної тематики «Дослідження гідродинаміки та процесів тепломасообміну в апаратах з дисперсною фазою» (номер державної реєстрації №0115U002551), термін виконання – 2015-2019рр. Замовник – Міністерство освіти і науки України.

Наукові результати та практичні рекомендації дисертаційної роботи впроваджені при виконанні НДДКР за господарчим договором: вдосконалення виробництва лікарської продукції, спецій та натуральних інгредієнтів ТОВ «Сумифітофармація» (договір №51.18-02.15.СП від 18 лютого 2015р.). Здобувач виступав в якості відповідального виконавця господарчих НДДКР.

Мета і завдання дослідження. Метою дисертаційної роботи є моделювання процесів класифікації та пневмозбагачення сипких сумішей у гравітаційному пневмокласифікаторі ромбічної форми та встановлення оптимальних режимних і конструктивних параметрів для ефективного процесу пневмокласифікації.

Для досягнення поставленої мети послідовно вирішені наступні завдання:

- проаналізовані конструкції та гідродинамічні характеристики пневмокласифікаторів сипких сумішей;
- розроблено фізичну модель гідродинаміки двофазного потоку та процесу пневмокласифікації;
- розроблено математичну модель гідродинаміки руху газового та газодисперсного потоку і процесу пневмокласифікації у вертикальному каналі перемінного перерізу;
- експериментально досліджено особливості гідродинаміки однофазного потоку, виносу частинок із зваженого шару різноманітних сипких сумішей, впливу режимних параметрів на ефективність пневмокласифікації з метою встановлення оптимального технічного режиму;
- створено методику інженерного розрахунку розробленого пневмокласифікатора;
- проведено порівняння основних типів пневмокласифікаторів по їх ефективності із запропонованою конструкцією пневмокласифікатора;
- видано рекомендації по використанню розробленого пневмокласифікатора у технологічних процесах капсулювання гранул мінеральних добрив та переробки лікарської рослинної сировини;
- проведено апробацію та впровадження отриманих наукових результатів.

Об'єкт дослідження – процес пневмокласифікації та пневмозбагачення сипких сумішей у гравітаційному пневмокласифікаторі ромбічної форми.

Предмет дослідження – особливості гідродинаміки газового та газодисперсного потоку, вплив режимних параметрів на процес розділення сипких сумішей на крупну та дрібну фракції у зваженому шарі пневмокласифікатора ромбічної форми.

Методи дослідження. У роботі використовувалися методи фізичного та математичного моделювання процесів пневматичної класифікації газодисперсних систем.

При проведенні експериментальних досліджень застосували методи багатofакторного планування експерименту. Для розв'язання диференціальних рівнянь використовували аналітичні та чисельні методи.

При математичному моделюванні та узагальненні отриманих експериментальних даних застосовано диференціальні методи математичного аналізу та інтегрального обчислення, які виконували за допомогою комп'ютерної техніки та пакета прикладних програм, а саме: MathCAD, MS Office Excel.

Наукова новизна одержаних результатів. На основі аналізу теоретичних та експериментальних даних одержано наступні наукові результати:

- вперше теоретично описано гідродинамічні умови та закономірності проведення процесу пневмокласифікації та пневмозбагачення у пневмокласифікаторі ромбічної форми;
- вперше отримано чисельний розв'язок нелінійної математичної моделі руху газодисперсного потоку, що дозволяє визначити швидкості газового потоку та твердих частинок з додатковим врахуванням сил тертя компонентів потоку та сил удару частинок о стінки вертикального каналу перемінного перерізу;
- вперше отримано залежність для визначення концентрації частинок твердої фази в потоці по висоті апарату перемінного перерізу з часом;
- вперше обґрунтовано використання двосторонньої циклічної подачі дисперсного потоку в робочу зону апарату з метою забезпечення чистоти дрібної та крупної фракції не менше 95%.

Практичне значення отриманих результатів.

- отримані аналітичні та чисельні розв'язки стаціонарних задач, що описують гідродинаміку однофазних і двофазних потоків, а також самого процесу пневмокласифікації представляють практичну цінність у інженерному моделюванні газодисперсних систем, а також при розробці пневмокласифікаторів змінного перетину.
- на підставі отриманих результатів запропоновано новий спосіб розділення сумішей сипких матеріалів, а також запропонована конструкція «ромбічного» пневмокласифікатора, що захищені патентами України;
- науково-технічні результати дисертаційної роботи впроваджено при виконанні господарсько-договірної та держбюджетних тем, що підтверджено отриманим актом впровадження.

Особистий внесок здобувача. Основні результати дисертаційної роботи, що складають її сутність, отримані особисто здобувачем. Серед них: статистичний збір матеріалу, його обробка, аналіз протікаючих процесів та роботи різних конструкцій класифікаторів для розділення дисперсних систем; проведення фізичного та математичного моделювання процесів, що проходять під час пневмокласифікації; розробка та апробація методики проведення експериментальних досліджень; створення експериментальної установки для дослідження гідродинаміки та ефективності роботи пневмокласифікатора. Вибір теми дисертаційної роботи, постановка мети та задач досліджень і формулювання висновків проводилися під керівництвом наукового керівника – к.т.н, доцента, Юхименко М.П.

Апробація результатів дисертації. Основні положення і результати дисертаційної роботи доповідалися та обговорювалися на: Науково-технічній конференції викладачів, співробітників, аспірантів і студентів факультету технічних систем та енергоефективних технологій «Сучасні технології в промисловому виробництві» (м. Суми, 2010 р.); міжнародній науково-технічній конференції «Хімічна технологія: наука і виробництво» (м. Шостка, 2012р.); науково-технічній конференції викладачів, співробітників, аспірантів і студентів факультету технічних систем та енергоефективних технологій «Сучасні технології в промисловому виробництві» (2013р.); IX Міжнародній

конференції «Стратегія якості в промисловості та освіті» (м. Варна, Болгарія, 2013р.); міжнародній науково-технічній конференції «Технологія-2013» (м. Северодонецьк, 2013 р.); III Всеукраїнській міжвузівській науково-технічній конференції «Сучасні технології у промисловому виробництві» (м. Суми, 2014р.); IV Всеукраїнській міжвузівській науково-технічній конференції «Сучасні технології в промисловому виробництві» (м. Суми, 2016р.).

Публікації. За результатами дисертаційної роботи опублікована 21 друкована праця, із них 7 статей – у наукових журналах (у т.ч. 5 - у наукових фахових виданнях, затверджених МОН України, 1 стаття – в міжнародному журналі і 1 стаття в виданні, що індексується базою Scopus), 11 публікацій тез доповідей в збірниках матеріалів конференцій та 2 патенти України на корисну модель і 1 патент України на винахід.

Структура та обсяг дисертації. Дисертаційна робота складається із вступу, п'яти розділів, висновків, списку використаних джерел на 14 сторінках, що охоплює 158 найменувань, та додатків. Загальний обсяг дисертації 169 сторінок, із них 10 таблиць, 58 ілюстрації і додатки на 24 сторінках.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обґрунтовано актуальність теми дослідження, показано зв'язок із науковими програмами, сформульовано мету і завдання досліджень, їх практичне значення та наукову новизну, наведено дані про особистий внесок здобувача, апробацію роботи, публікації та подано загальну характеристику роботи.

У першому розділі на основі огляду літературних джерел і проведеного патентного пошуку приведено класифікацію систем і обладнання для розділення сипких матеріалів на фракції.

Проаналізовані сучасний стан та шляхи розвитку технологій та техніки розділення сипких сумішей, а також особливості конструкцій та роботи обладнання для пневмокласифікації. Наведено основні математичні моделі розрахунку процесів пневмокласифікації.

Також розглянуто і проаналізовано фізичні умови та механізми руху двофазних потоків в каналі пневмокласифікатора. Проаналізовані та наведені основні підходи до математичного моделювання руху двофазних систем. Наведені вихідні рівняння та залежності для моделювання гідродинаміки руху газу та твердих частинок при пневмокласифікації. Проаналізовані сили, які діють на тверду частинку в процесі пневмокласифікації.

На підставі розглянутих конструкцій апаратів для розділення сипких сумішей в газовому потоці, методик їх математичного моделювання, ефективності роботи, а також основних недоліків розглянутих підходів по вивченню процесів пневмокласифікації, визначено основні напрямки і задачі проведення досліджень.

У другому розділі наведено основні фізико-хімічні характеристики модельного матеріалу, що використовувався для експериментальних досліджень. У якості основного модельного матеріалу використовувалась

суміш кварцового піску, який найбільш підходить до вимог проведення дослідів, тому що має достатню міцність та поділяється на вузькі по розмірам окремі фракції, що витікає із його фізичних властивостей.

Також наведені методика та основні методи експериментальних досліджень процесів пневмокласифікації, які було проведено в лабораторних умовах кафедри.

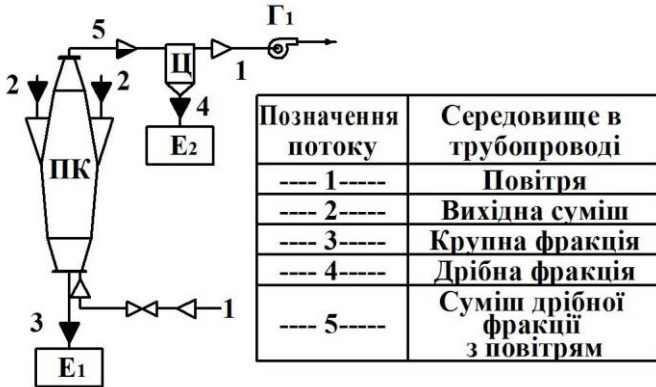


Рисунок 1 - Схема експериментальної установки: Ц - циклон; Г₁ - газодувка; ПК - пневмокласифікатор; E₂ - бункер збору дрібної фракції; E₁ - бункер збору крупної фракції



Рисунок 2 – Фото експериментальної установки для дослідження гідродинаміки і ефективності пневмокласифікації

Експериментальні дослідження виконувались на лабораторному стенді (рисунок 1, рисунок 2).

Вихідна суміш сипких матеріалів поступає у завантажувальні бункери апарату, із яких потрапляє в середню частину корпусу пневмокласифікатора. В нижню частину апарату поступає повітряний потік, витрата якого регулюється тарованим колектором з регулюючою засувкою. Фракція (дрібнодисперсна частина) виноситься потоком повітря і потрапляє в циклон, де осаджуються дрібні частинки в бункер E₂, а повітряний потік виноситься в атмосферу. Крупнодисперсна частина просипається в нижню частину апарату і через розподільний пристрій виводиться в бункер E₁. Всмоктувальний повітряний потік створюється за допомогою газодувки Г₁.

Також розроблена лабораторна установка для дослідження швидкості витання полідисперсних систем і аналізу можливостей роботи пневмокласифікатора з різними матеріалами. Визначення похибки вимірювань і узагальнення результатів базується на загальноприйнятих методиках і рекомендаціях із проведення інженерного експерименту та обробці отриманих даних.

У третьому розділі наведено фізичну модель процесів, що відбуваються при русі газодисперсного потоку в корпусі пневмокласифікатора, а саме рух газового потоку і частинок сипкого матеріалу, та їх взаємодія між собою.

Корпус апарату (рисунок 3) ромбічної форми, з кутами розкриття $\alpha_1 = 8^\circ - 9^\circ$ і закриття $\alpha_2 = 10^\circ - 11^\circ$. В завантажувальний бункер 4 подають вихідний матеріал С, який представляє собою бінарну суміш. Матеріал в потрібній кількості дозується у середню частину корпусу 1, де підхвачується повітряним потоком В, який поступає в апарат через розвантажувальний патрубок 5.

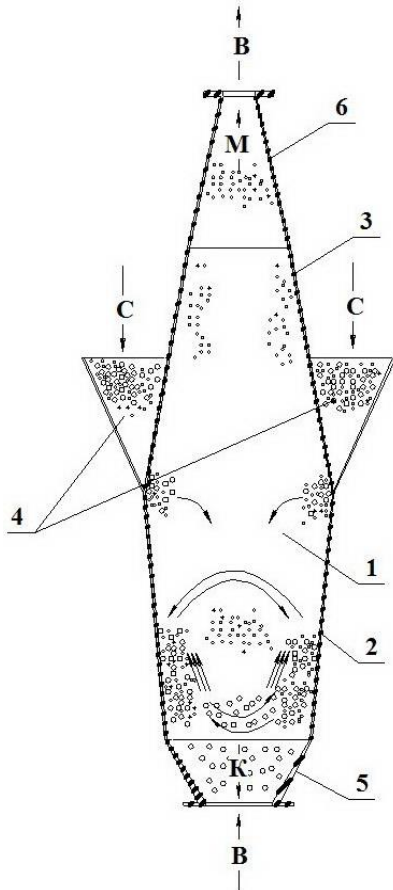


Рисунок 3 - Схема роботи пристрою для пневмокласифікації: 1 - корпус; 2 - зона сепарації матеріалу; 3 - зона розганяння і транспортування дрібної фракції матеріалу; 4 - завантажувальні бункери; 5 - розвантажувальний патрубок для крупної фракції; 6 - розвантажувальний патрубок для виведення дрібної фракції.

Тому в нижній частині корпусу створюється нестабільна зона, яка руйнує сформований шар матеріалу, що обертається. Також із-за піджимання потоку, дозавантаження шару матеріалом проходить нерівномірно, що впливає, в першу чергу, на якість розділення матеріалу та на втрату крупної фракції, яка потрапляє в зону виносу дрібної фракції, а також на забруднення крупної фракції дрібною.

В нижній частині 2, створюється обертовий шар матеріалу, в якому концентрується крупна фракція К і дрібна фракція М. Повітряний потік В рухає обертовий шар матеріалу від стінки до стінки, що сприяє витяганню дрібної фракції М повітряним потоком. Дрібні частинки транспортуються у верхню частину апарату, і розганяючись у зоні 3 виводяться із апарату через розвантажувальний патрубок 6, а крупна фракція К випадає в нижню частину апарату, і виводиться через розвантажувальний патрубок 5. Далі подається наступна доза матеріалу в одиничній кількості і процес класифікації починається спочатку.

Проведені експериментальні дослідження визначення швидкості газового потоку в ненавантаженому апараті в різних його перетинах, з використанням полички в зоні вводу повітряного потоку і без неї, показали, що наявність полички негативно впливає на гідродинаміку руху потоку, оскільки газовий потік двічі змінює свою траєкторію, спочатку на вході в корпус піджимається у лівий бік, а потім різко піджимається у правий бік.

Результати досліджень швидкості витання полідисперсних матеріалів (рисунок 4) показали різницю швидкостей витання домішок і досліджуемого матеріалу. Зі збільшенням швидкості газового потоку, доля винесеного матеріалу збільшується, тобто вибираючи швидкість газового потоку, потрібно враховувати при якій швидкості частинки певного розміру разом із домішками почнуть виноситись з апарату або провалюватись в провал.

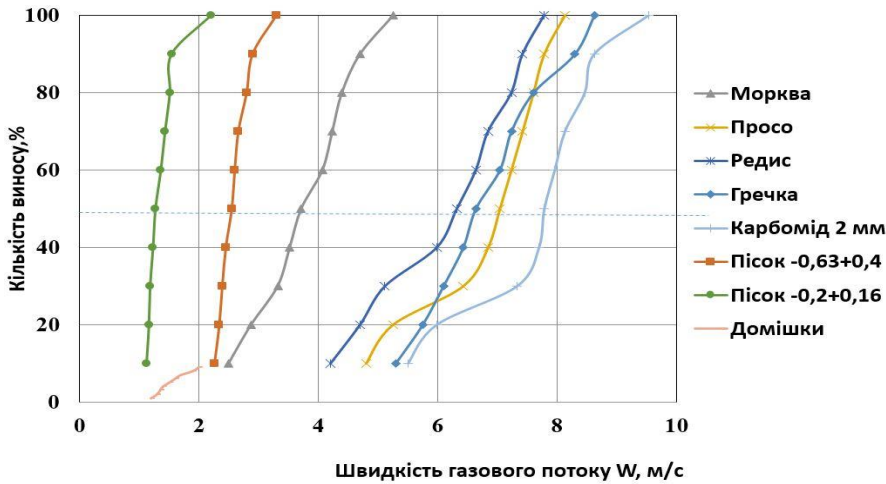


Рисунок 4 – Залежність кількості виносу частинок матеріалу і домішок від швидкості газового потоку

Результати дослідження процесу пневмокласифікації піскової суміші представлені залежностями впливу витрати та швидкості газового потоку на ефективність пневмокласифікації, як втрат товарної фракції за рахунок її виносу у циклон (рисунок 5, рисунок 6).

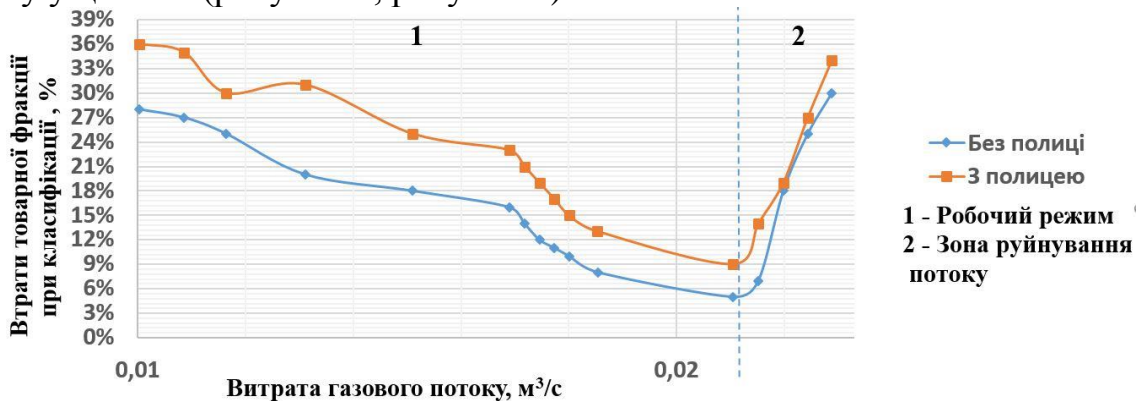


Рисунок 5 – Залежність втрат товарної фракції сипкого матеріалу від витрати газового потоку

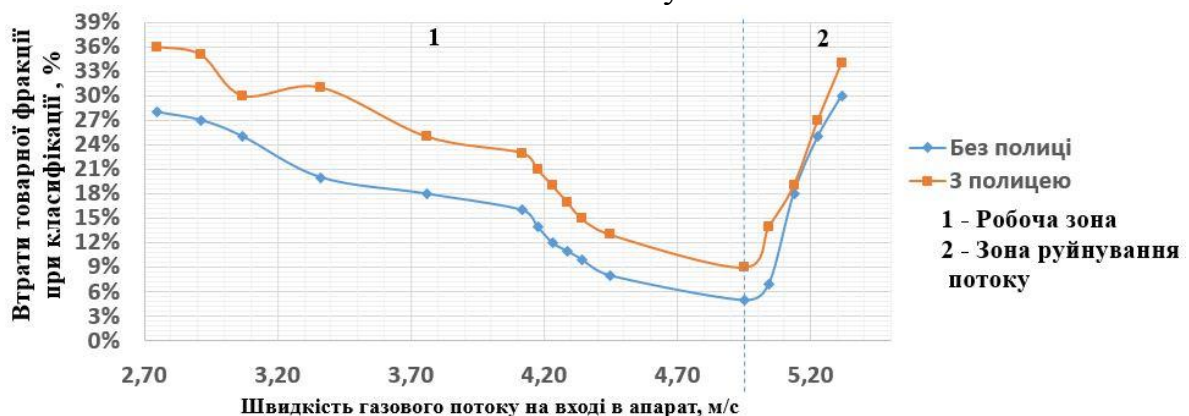


Рисунок 6 – Залежність втрат товарної фракції сипкого матеріалу від швидкості газового потоку

Дослідження впливу на ефективність пневмокласифікації часу розвантаження і дозавантаження матеріалу у апарат (рисунок 7, рисунок 8), показали наявність оптимальних меж вказаного часу.



Рисунок 7 – Залежність втрат товарної фракції від часу дозавантаження обертаючого шару матеріалу на прикладі кварцового піску

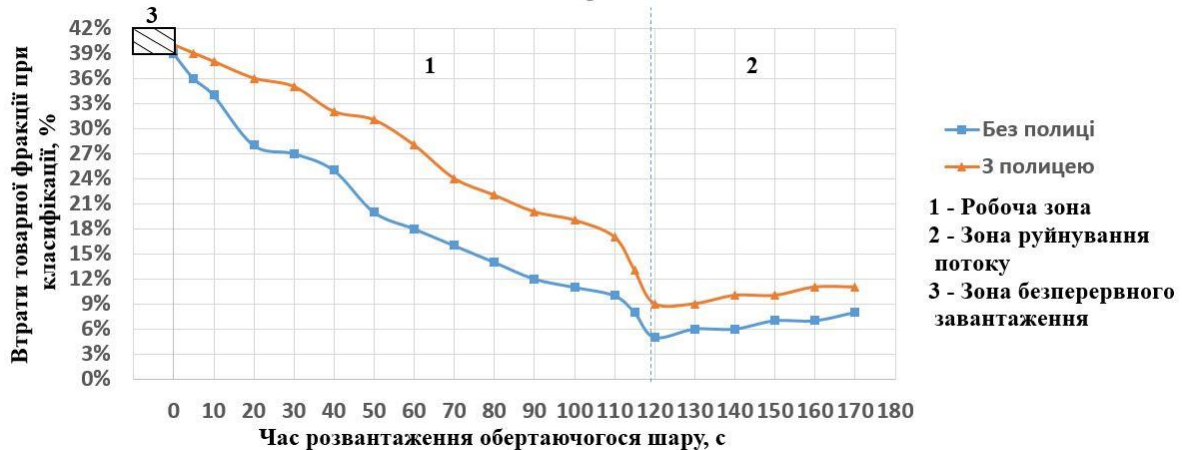


Рисунок 8 – Залежність втрат товарної фракції від часу розвантаження обертаючого шару матеріалу

Для визначення часу дозавантаження матеріалів різного гранулометричного складу, на основі отриманих експериментальних даних отримане рівняння (1), що показує залежність часу дозавантаження від відношення розміру крупної фракції частинок до розміру дрібної фракції частинок (рисунок 9).

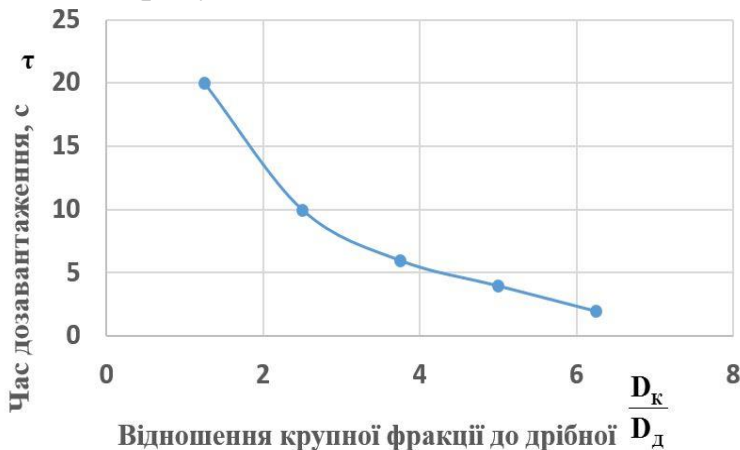


Рисунок 9 – Залежність втрат товарної фракції від часу дозавантаження обертаючого шару матеріалу на прикладі кварцового піску

$$\tau = a \cdot \left(\frac{D_K}{D_D} \right)^n, \quad (1)$$

де $a = 30,741$; $n = -1,348$.

Також проведені дослідження по ефективності розділення різноманітних сипких матеріалів на фракції, які різняться за розміром, формою, густиною та швидкістю витання, в ході яких показана достатня ефективність розділення у створеному «ромбічному» пневмокласифікаторі сумішей різноманітних сипких матеріалів. Так як апарат здатен розділяти суміш піску, фракції якого мають дуже близьку швидкість витання при однаковій густині, то ефективність розділення більш крупних матеріалів, які ще й мають різну форму та більш відмінну швидкість витання один від одного, збільшиться. Забрудненість крупної фракції дрібною не перевищує 5%, розглядаючи пісочну суміш, а відносно інших матеріалів – тільки зменшується.

У четвертому розділі наведено математичні моделі гідродинаміки руху двофазного потоку в процесі пневмокласифікації сипкого матеріалу в «ромбічному» апараті. Отримані аналітичні залежності дають можливість розрахувати режимні параметри процесу, а саме швидкість руху потоку газу та твердих частинок, концентрацію дрібних частинок у зваженому шарі, а також отримати траєкторії руху газодисперсного потоку у вертикальному каналі що розширюється, тобто має перемінний переріз.

При моделюванні гідродинаміки однофазного газового потоку розглядався вертикальний рух потоку по осі Z у вертикальному каналі і горизонтальний рух потоку по осі X .

Рівняння, яке описує рух газового потоку в корпусі апарату:

$$\rho_{\Gamma} W_{\Gamma z} \frac{dW_{\Gamma z}}{dz} = - \frac{\lambda_{TP} \rho_{\Gamma} W_{\Gamma z}^2}{D_{\text{э}} 2} \quad (2)$$

Коефіцієнт тертя з рівняння (2) визначається за формулою Дарсі-Вейсбаха, і залежить від режиму руху газового потоку:

$$\lambda_{TP} = \frac{C}{\text{Re}^n} \quad (3)$$

Для оцінювання значень коефіцієнтів C і n визначається сумарне квадратичне відхилення R теоретичних значень швидкості потоку w_H від відповідних експериментальних значень w_k .

$$R(C, n) = \sum_{k=1}^N \left[\frac{w_H^{-n}}{w_k^{-n}} - 1 \right]^2 \rightarrow \min \quad (4)$$

Функція похибки $R(n)$:

$$R_{(n)} = \sum_{k=1}^N \left[\left[w_0^n - \frac{C_{(n)} v^n}{2\theta} \left(\frac{1}{d_0^n} - \frac{1}{d_k^n} \right) \right]^{\frac{1}{n}} - w_k^n \right]^2 \quad (5)$$

Формула (5) показує залежність похибки $R(n)$ від значення експериментального коефіцієнту (n). Похибка буде мінімальна коли n прямує до 0. Отже режим руху газового потоку – розвинений турбулентний.

Тому, для випадку коли $n = 0$ розрахунки мають проводитись по формулі:

$$R_{(C)} = \sum_{k=1}^N \left[w_1 \cdot \left(\frac{d_k}{d_1} \right)^{-\frac{C}{2\theta}} - w_{\kappa}^n \right]^2 \quad (6)$$

Постійна C з залежності (6):

$$C = 2\theta \cdot \frac{\sum_{k=1}^N \left(\ln \left(\frac{d_1}{d_k} \right) \ln \left(\frac{w_{\kappa}}{w_1} \right) \right)}{\sum_{k=1}^N \left(\ln \left(\frac{d_1}{d_k} \right)^2 \right)} \quad (7)$$

Значення коефіцієнту C дає змогу визначити швидкість газового потоку по висоті апарату і побудувати залежність зміни швидкості газового потоку по висоті робочого простору апарату.

Зміна швидкості газового потоку по висоті апарату:

$$W_{\Gamma} = w_0 \cdot \left[\frac{d_{\kappa}}{d_1} \right]^{-\frac{C}{2\theta}} \quad (8)$$

Залежність (8) показує що значення швидкості зменшується по висоті робочого простору апарату.

Зміна швидкості газового потоку по ширині апарату:

$$W_{\Gamma_x} = W_{\Gamma_z} \left(1 - \frac{X}{B} \right)^{\frac{1}{n}} \quad (9)$$

Залежність (9) показує що значення швидкості зменшується по ширині робочого простору апарату.

Експериментальна стала n визначається з умови мінімуму сумарного квадратичного відхилення теоретичних значень швидкостей потоку від відповідних експериментальних значень.

$$n = \frac{\sum_{m=1}^M \left(\ln \left(1 - \frac{x_m}{B} \right) \ln \left(\frac{w_{x_m}}{w_1} \right) \right)}{\sum_{m=1}^M \left(\ln \left(\frac{w_{x_m}}{w_1} \right)^2 \right)} \quad (10)$$

Траєкторії руху газового потоку без навантаження матеріалом (рисунок 10) визначаються:

$$z_{(x,x_0)} = \frac{B \cdot n}{n-1} \left[\left(1 - \frac{x_0}{B} \right)^{\frac{n-1}{n}} - \left(1 - \frac{x}{B} \right)^{\frac{n-1}{n}} \right] \quad (11)$$

Отримані рішення рівнянь (8 – 9) дають можливість визначити швидкість газового потоку в кожній точці апарату, а також оцінити зміни швидкості потоку по висоті та ширині корпусу. Це важливо для підбору раціональних гідродинамічних параметрів потоку при розділенні полідисперсної суміші зернистих матеріалів. Рівняння (11) дає змогу побудувати траєкторію руху газу в робочому просторі апарату (рисунок 10), що дає можливість оцінити вплив кутів розкриття ромбу на зміни в русі газового потоку.

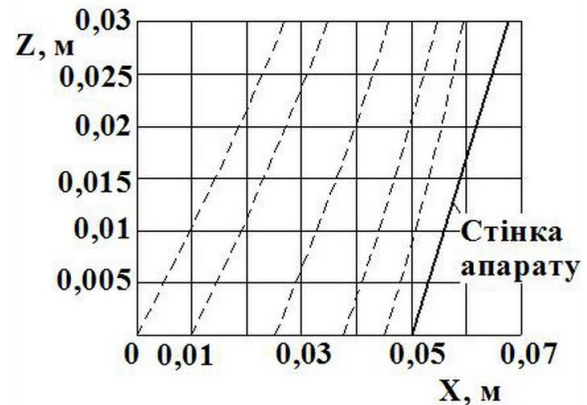


Рисунок 10 – Ліній току газу в ненавантаженому робочому просторі апарату

При моделюванні гідродинаміки руху окремої частинки в газовому потоці розглядався вертикальний рух частинки по осі Z і горизонтальний рух частинки по осі X .

$$\begin{cases} m_T \frac{dU_{Tz}}{d\tau} = -m_T g + S_T \zeta \frac{\rho_G (W_G - U_{Tz})^2}{2} \\ m_T \frac{dU_{Tx}}{d\tau} = S_T \zeta \frac{\rho_G (W_G - U_{Tx})^2}{2} \end{cases} \quad (12)$$

Зробивши перетворення отримуємо:

$$\begin{cases} U_{Tz} \frac{dU_{Tz}}{dZ} = -g + \frac{3}{4} \zeta \frac{\rho_G (W_G - U_{Tz})^2}{\rho_T d_T} \\ U_{Tx} \frac{dU_{Tx}}{dX} = \frac{3}{4} \zeta \frac{\rho_G (W_G - U_{Tx})^2}{\rho_T d_T} \end{cases} \quad (13)$$

Інтегрування першого рівняння системи (13) методом Рунге-Кутта 4-го порядку, дозволяє отримати рівняння (14), за допомогою якого отримується залежність, яка показує збільшення швидкості руху твердої частинки в вертикальному напрямку робочого простору апарату (U_{Tz}) та зменшення швидкості газового потоку (W_{Gz}):

$$D_z(z, U_{Tz}) = \frac{-g + \frac{3}{4} \zeta \frac{\rho_G (W_{Gz} - U_{Tz})^2}{\rho_T d_T}}{U_{Tz}} \quad (14) \quad D_x(x, U_{Tx}) = \frac{\frac{3}{4} \zeta \frac{\rho_G (W_{Gx} - U_{Tx})^2}{\rho_T d_T}}{U_{Tx}} \quad (15)$$

Інтегруванням другого рівняння системи (13) методом Рунге-Кутта 4-го порядку отримується залежність, яка показує збільшення швидкості руху твердої частинки (U_{Tx}) у горизонтальному напрямку робочого простору апарату та зменшення швидкості газового потоку (W_{Gx}). Отримані значення швидкості частинки у вертикальному і горизонтальному напрямку дають можливість визначити траєкторії частинок у проточній частині апарату (рисунок 11), а також оцінити зміни швидкості одиночної частинки по висоті та ширині корпусу.

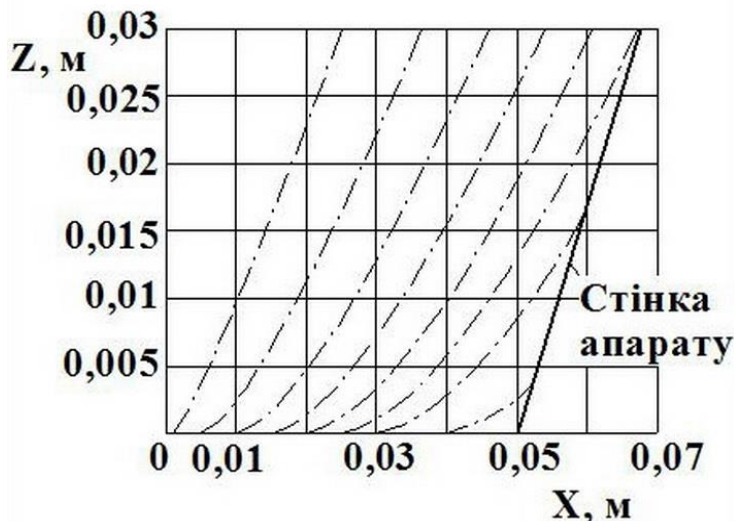


Рисунок 11 – Траєкторії руху твердої частинки в ненавантаженому апараті

З представлених (рисунок 11) траєкторій видно, що частинка в нижній частині корпусу має практично нульову швидкість, а потім починає поступово розганятись під дією газового потоку. При чому швидкість в вертикальному напрямку більша, ніж горизонтальна швидкість, яка відносить частинку до бокової стінки апарату. Оцінюючи траєкторії руху частинки, можна зробити висновок, що вплив газового потоку на одиночну

частинку досить високий, і частинку піджимає під стінки апарату, тому траєкторія польоту частинку йде по плавній дузі, на що також впливає кут розкриття ромбу, який має сильний вплив на газовий потік.

При моделюванні гідродинаміки руху двофазного потоку розглядався вертикальний рух потоків по осі Z і горизонтальний рух потоків по осі X . Сили, які діють на тверді частинки і газовий потік при умові вертикального руху потоків по осі Z , зводяться в систему:

$$\begin{cases} \beta\rho_T U_T \frac{dU_T}{dz} = \beta\rho_T g (1 - f_{TP} \cos \alpha) - \zeta\beta k \frac{(W_\Gamma - U_T)^2}{2} \rho_\Gamma \\ (1 - \beta)\rho_\Gamma W_\Gamma \frac{dW_\Gamma}{dz} = -\frac{\lambda_{TP}}{D_\varnothing} \cdot \frac{\rho_\Gamma W_\Gamma^2}{2} + \zeta\beta k \frac{(W_\Gamma - U_T)^2}{2} \rho_\Gamma \end{cases} \quad (16)$$

Зробивши заміни у позначеннях $W_\Gamma = U_1; U_T = U_2$; $\cos \alpha = \frac{1}{\sqrt{1 + \theta^2}}$,

отримується система диференціальних рівнянь (17). Інтегруючи методом Рунге-Кутта 4-го порядку для граничного значення швидкості $U_0 = 0$, отримуємо вектор-функцію перших похідних для визначення швидкості частинок і повітряного потоку в вертикальному напрямку по осі Z .

$$\begin{cases} \frac{\partial U_2}{\partial z} = \frac{-g \left(1 + \frac{f_{TP}}{\sqrt{1 + \theta^2}}\right) - \zeta k \frac{(U_1 - U_2)^2}{2} \cdot \frac{\rho_\Gamma}{\rho_T}}{U_2} \\ \frac{\partial U_1}{\partial z} = \frac{-\frac{\lambda_{TP}}{D_\varnothing} \cdot \frac{U_1}{2} + \zeta k \frac{(U_1 - U_2)^2}{2}}{(1 - \beta)U_1} \end{cases} \quad (17) \quad D_z(z, U) = \begin{bmatrix} \frac{-g \left(1 + \frac{f_{TP}}{\sqrt{1 + \theta^2}}\right) - \zeta k \frac{(U_1 - U_2)^2}{2} \times \frac{\rho_\Gamma}{\rho_T}}{U_2} \\ \frac{-\frac{\lambda_{TP}}{D_\varnothing} \times \frac{U_1}{2} + \zeta k \frac{(U_1 - U_2)^2}{2}}{(1 - \beta)U_1} \end{bmatrix} \quad (18)$$

За допомогою рівняння (18) отримуємо залежність, яка показує збільшення швидкості частинок (U_{T_z}) і зменшення швидкості повітряного потоку (W_{Γ_z}) в умовах двофазного потоку у вертикальному напрямку по осі Z робочого простору апарату.

Сили, які діють на тверді частинки і газовий потік при умові горизонтального руху потоків по осі X , зводяться в систему:

$$\begin{cases} \beta\rho_T \frac{dU_T}{dX} = \zeta\beta k \frac{(W_\Gamma - U_T)^2}{2} \rho_\Gamma - 2f_{TP}\beta\rho_T \frac{U_T}{\tau_K} \\ (1 - \beta)\rho_\Gamma W_\Gamma \frac{dW_\Gamma}{dX} = -\zeta\beta k \frac{(W_\Gamma - U_T)^2}{2} \rho_\Gamma \end{cases} \quad (19)$$

Систему рівнянь (19) інтегруємо методом Рунге-Кутта 4-го порядку для граничного значення швидкості $U_0 = 0$, та отримуємо систему рівнянь для визначення швидкості частинок і повітряного потоку в горизонтальному напрямку по осі X у вигляді вектор-функції перших похідних.

Відповідно отримуємо залежність, яка показує збільшення швидкості частинок (U_{T_x}) і зменшення швидкості газового потоку (W_{Γ_x}) в умовах

двофазного потоку у горизонтальному напрямку по осі X робочого простору апарату:

$$D_x(x,U) = \left[\begin{array}{l} \frac{\zeta_k (U_1 - U_2)^2 \cdot \frac{\rho_r}{\rho_T} - 2f_{TP} \beta \rho_T \frac{U_T}{\tau_K}}{U_2} \\ -\frac{\zeta_k (U_1 - U_2)^2}{2} \\ (1-\beta)U_1 \end{array} \right] \quad (20)$$

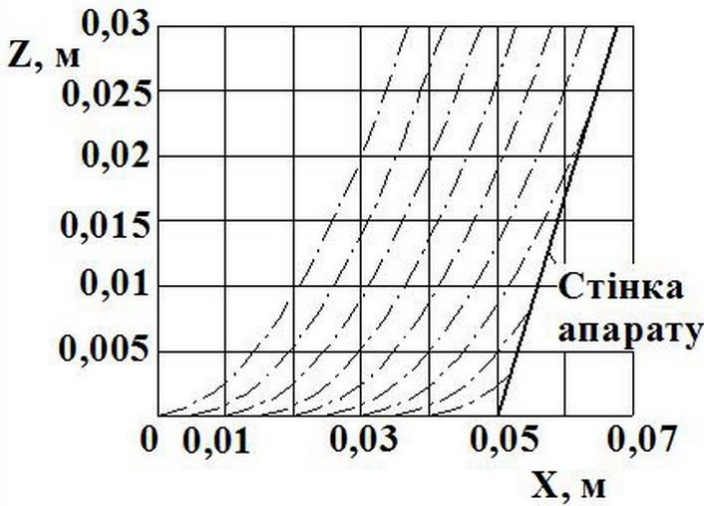


Рисунок 12 – Траєкторії руху твердих частинок в навантаженому апараті

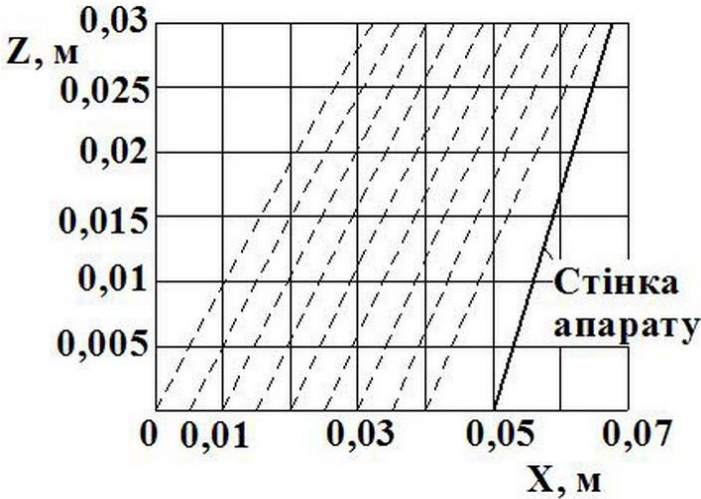


Рисунок 13 – Лінії току газового потоку в навантаженому апараті

При математичному моделюванні процесу пневмокласифікації розглядається зміна концентрації частинок дрібної фракції (C_M) в виділеному об'ємі зваженого шару матеріалу у часі та просторі.

$$\begin{aligned} G_{cl} \frac{\partial C_M(\tau)}{\partial \tau} &= G_{cl} (U_T \text{grad} C_M) + G_{cl} K_y (C_M^* - C_M(\tau)) = \\ &= \left(U_{Tx} \frac{\partial C_M}{\partial X} + U_{Ty} \frac{\partial C_M}{\partial Y} + U_{Tz} \frac{\partial C_M}{\partial Z} \right) + G_{cl} K_y (C_M^* - C_M(\tau)) \end{aligned} \quad (21)$$

Отримані рішення рівнянь (18) та (20) дають можливість визначити швидкість двофазного потоку в кожній точці апарату, а також оцінити зміни швидкості частинок сипкого матеріалу по висоті та ширині корпусу в залежності від дії на нього газового потоку. Можна зазначити, що дія на частинки сил тертя, стисненості потоку і сил співударання між частинками та стінками апарату значно впливає на швидкість частинок в потоці, і вона знижується. Швидкість газового потоку також знижується, бо створюється додатковий гідравлічний опір за рахунок скупчення матеріалу у агломерати. Оцінюючи траєкторії руху частинок (рисунок 12) та газового потоку (рисунок 13), бачимо, що траєкторія польоту частинок вирівнюється, і газовий потік вже не так явно піджимає частинки до стінок.

Зробивши певні припущення і перетворення Лапласа, отримаємо рівняння для розв'язання нестационарної задачі визначення концентрації дрібних частинок у зваженому шарі по висоті апарату Z з часом τ :

$$C_M(Z, \tau) = C_{\text{ex}} e^{\frac{-kZ}{U_T}} H\left(\tau - \frac{Z}{U_T}\right) + C_M^* + (C_0 - C_M^*) e^{-k\tau} - C_M^* e^{\frac{-kZ}{U_T}} \times \\ \times H\left(\tau - \frac{Z}{U_T}\right) - (C_0 - C_M^*) e^{-k\tau} H\left(\tau - \frac{Z}{U_T}\right) = C_M^* + (C_{\text{ex}} - C_M^*) e^{\frac{-kZ}{U_T}} \times \quad (22) \\ \times H\left(\tau - \frac{Z}{U_T}\right) + (C_0 - C_M^*) e^{-k\tau} \left[1 - H\left(\tau - \frac{Z}{U_T}\right)\right]$$

Якщо $C_{\text{ex}} = C_0 = \text{const}$, то:

$$C_M(Z, \tau) = C_M^* + (C_0 - C_M^*) \left\{ e^{\frac{-kZ}{U_T}} H\left(\tau - \frac{Z}{U_T}\right) + e^{-k\tau} \left[1 - H\left(\tau - \frac{Z}{U_T}\right)\right] \right\} \quad (23)$$

Використовуючи формулу (23) будується графік зміни концентрації дрібних частинок у зваженому шарі по висоті апарату Z з часом τ (рисунок 14).

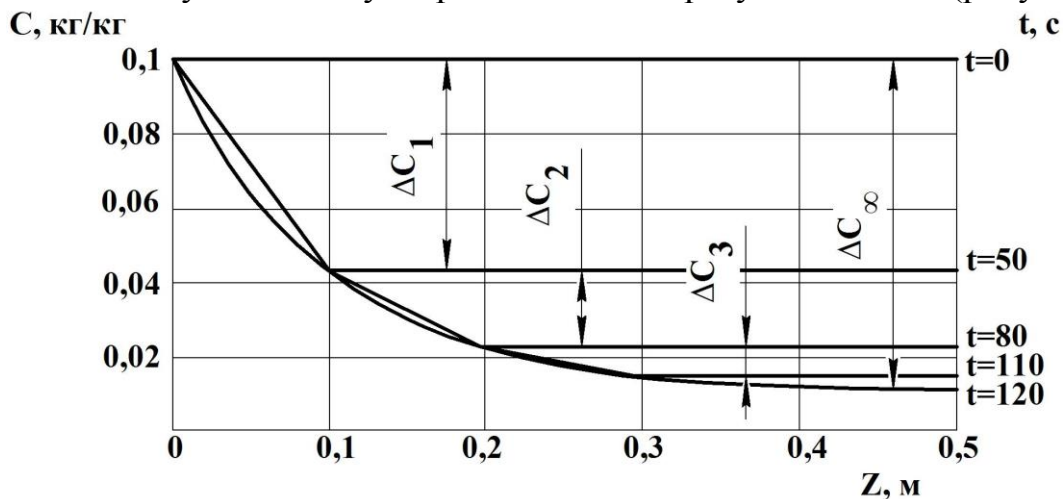


Рисунок 14 – Залежність зміни концентрації дрібних частинок у зваженому шарі по висоті апарату Z з часом τ

З залежності (рисунок 14) витікає, що з часом концентрація дрібних частинок знижується по висоті апарату, тобто йде розділення суміші матеріалу, і крупна фракція випадає в бункер для збору крупної фракції. Частина крупної фракції залишається в обертаючомуся шарі матеріалу, бо створені агломерати дрібної фракції затримують частинки крупної фракції. З проміжком часу крупні частинки, які затримались в шарі, також поступово випадають з нього.

У п'ятому розділі проведено узагальнення результатів досліджень процесів пневмокласифікації. На основі аналізу і співставлення отриманих теоретичних та експериментальних досліджень, розроблено інженерну методику розрахунку апаратів для пневмокласифікації.

Порівняння результатів розрахунків та експериментальних замірів швидкості газового потоку по вертикальній осі Z і по горизонтальній осі X робочого об'єму апарату представлено на рисунках 15 та 16.

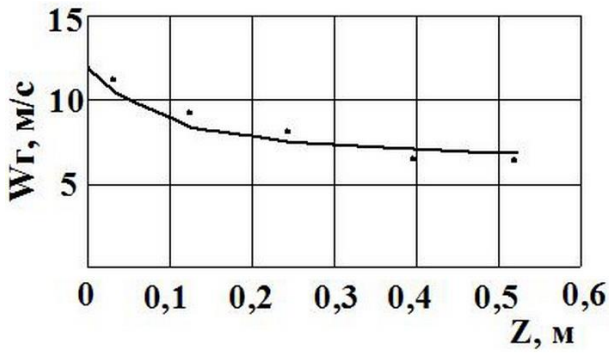


Рисунок 15 – Порівняння теоретичних (лінія) та експериментальних (точки) значень зміни швидкості газопотоку по висоті робочого простору апарату

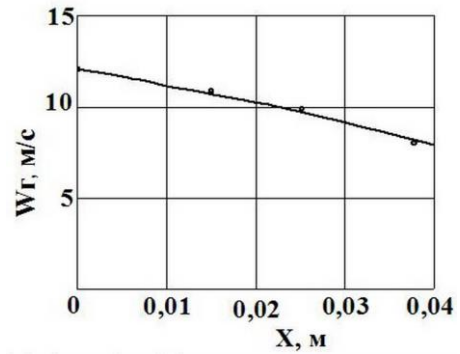


Рисунок 16 – Порівняння теоретичних (лінія) та експериментальних (точки) значень зміни швидкості газопотоку по ширині робочого простору апарату

Із представлених залежностей витікає, що розрахунки згідно математичної моделі підтверджують отримані в ході експерименту данні, і похибка не перевищує 2%.

Для співставлення результатів по якості розділення на дрібну та крупну фракції, отриманих за математичною моделлю і у експерименті, будується загальний графік зміни концентрації дрібних частинок у зваженому шарі з часом τ (рисунок 17). Ця залежність показує, що в процесі класифікації концентрація дрібних частинок у зваженому шарі постійно падає, до моменту повного розділення суміші матеріалу на крупну і дрібну фракцію. Весь процес класифікації складеться з двох циклів. Перший цикл – це цикл розвантаження шару матеріалу, який сформувався в апараті і обертається. Час циклу складає 120 секунд. Це обумовлено тим, що шару матеріалу потрібен час для максимального розвантаження, але при цьому шар не повинен зруйнуватись і порушити умови процесу. Далі процес переходить у другий цикл – цикл дозавантаження шару матеріалу, що обертається. Даний цикл триває 20 секунд. Цикли чергуються між собою до повного розділення завантаженого матеріалу. Загальний час становить в середньому за 39 циклів - 46 хвилин.

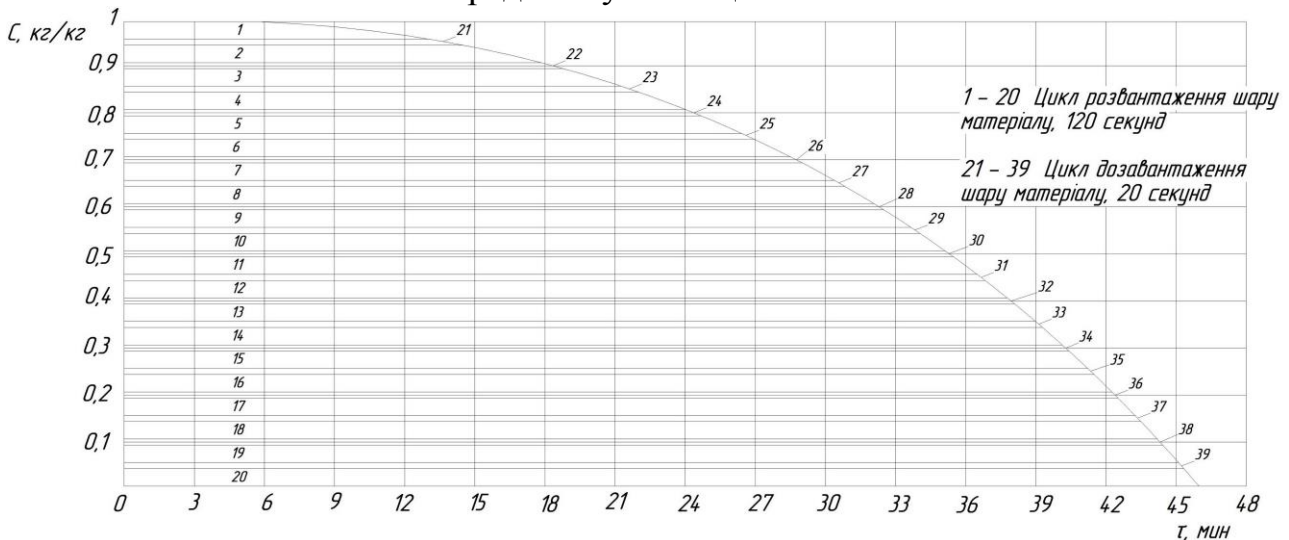


Рисунок 17 – Залежність зміни концентрації дрібних частинок у зваженому шарі з часом τ

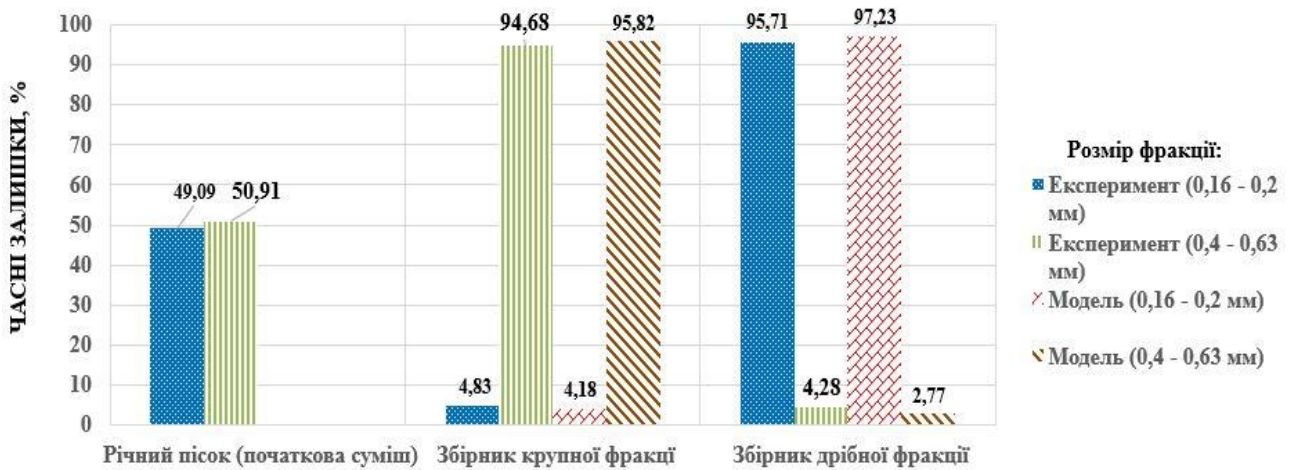


Рисунок 15– Оцінка якості пневмокласифікації річного піску, в порівнянні експерименту та математичної моделі

Оцінюючи данні отримані з гістограми (рисунок 18) щодо класифікації річного піску, можна зробити висновок, що математична модель пневмокласифікації дозволяє оцінити якість розділення на дрібну та крупну фракції різних сипких матеріалів, а також на її основі отримати гідродинамічні і конструктивні параметри для розрахунку процесу пневмокласифікації та для проектування раціональної конструкції пневмокласифікатора. Похибка між результатами розрахунків за математичною моделлю і експериментом складає приблизно 2%.

Порівняння основних типів пневмокласифікаторів проводиться на основі двох основних показників - граничного розміру розділення та показника ефективності вилучення дрібної фракції у винос, який при умові ідеальної класифікації дорівнює одиниці (таблиця 1).

Таблиця 1 – Показники основних типів пневмокласифікаторів

№ п.п	Тип пневмокласифікатора	Граничний розмір розділення d_{zp} , мм	Ефективність вилучення ε_m , частки	Гідрравлічний опір ΔP , Па
1	Гравітаційні:			
1.1	Шахтні (пустотілі)	0,05 – 0,1	0,2 – 0,25	50-150
1.2	«Ромбічний» (змінного перетину)	0,06 – 4,0	0,95 – 0,97	80-200
1.3	Типу «Зигзаг»	0,1 - 10	0,7 – 0,75	200-700
1.4	Поличні	0,06 – 7,0	0,8 – 0,85	200-1000
1.5	Киплячого шару	0,5 – 1,0	0,3 – 0,4	1800-2500
2	Інерційні			
3	Відцентрові:			
3.1	Повітряно-прохідні	0,02 – 0,1	0,2 – 0,35	1200-1500
3.2	Повітряно-замкнуті	0,028 – 0,088	0,45 – 0,57	1500-2000
3.3	Вихрові	0,008 – 0,01	0,59	700-1000

В «ромбічному» пневмокласифікаторі змінного перетину завдяки активному аеродинамічному режиму та циклічному механізму проведення

процесу досягається більш ефективно фракційне розділення сипких зернистих матеріалів. Показники ефективності розділення та чистоти фракції перевищують показники пневмокласифікаторів інших типів. Сферами використання таких апаратів будуть підприємства, де потрібен високий ступінь розділення і чистоти фракції у відносно невеликих об'ємах. Виходячи з того, що апарат пустотілий і має незначний гідравлічний опір в межах 80 - 200 Па, енергоресурси використані для роботи установки в цілому будуть значно меншими, ніж у всіх інших представлених пневмокласифікаторів. Для підвищення продуктивності можна використати каскад пневмокласифікаторів, апарати в якому будуть встановлені послідовно.

Під час виконання дисертаційної роботи отримані результати використовувались в рамках держбюджетної тематики «Розробка та дослідження високоефективних апаратів для процесів масообміну, кристалізації та класифікації» (номер державної реєстрації 0110U001953), а саме були проведені дослідження високоефективних апаратів для пневмокласифікації. В рамках виконання робіт по господарчому договору за темою «Сучасні технології та обладнання для сепарації і класифікації дисперсних сумішей рослинної сировини» проведені експерименти з матеріалами підприємства ТОВ «Фітофармація», та видані рекомендації щодо вдосконалення існуючого виробництва лікарської рослинної продукції, спецій та натуральних інгредієнтів у вигляді технічних пропозицій та практичних рекомендацій щодо використання «ромбічного» класифікатора для процесів класифікації дисперсних сумішей при переробці рослинної сировини, що засвідчено відповідним актом впровадження.

У додатках наведено акт впровадження наукових результатів дисертаційної роботи, блок схему інженерного розрахунку, результати експериментів по швидкості витання, лістинг програми для розрахунку гідродинаміки руху однофазного газового потоку, лістинг програми для розрахунку гідродинаміки руху окремої частинки в газовому потоці, лістинг програми для розрахунку гідродинаміки руху двофазного газового та дисперсного потоків, а також лістинг програми для оцінки зміни концентрації дрібних частинок в робочому об'ємі апарату в залежності від часу

ВИСНОВКИ

1. Аналіз фізичних умов розділення сумішей сипких матеріалів та існуючих конструкцій пневмокласифікаторів дозволив обґрунтувати можливість підвищення ефективності розділення різноманітних сумішей сипких матеріалів за рахунок ромбічної форми корпусу і запропонованого циклічного механізму проведення процесу пневмокласифікації.

2. Розроблено фізичну модель процесів розділення сипких сумішей у пневмокласифікаторі, яка пояснює гідродинамічні умови розділення сипких сумішей на фракції, формування «подушки» матеріалу, що обертається, а також механізми дозавантаження та розвантаження «подушки» матеріалу.

3. Розроблено математичну модель гідродинаміки руху двохфазного потоку та процесів класифікації сипких сумішей, за допомогою якої отримано основні розрахункові залежності, що визначають швидкості руху газового потоку та одиночної частинки сипкого матеріалу та при взаємодії газового потоку та суміші частинок сипкого матеріалу, а також ефективність вилучення дрібної або крупної фракції з суміші сипкого матеріалу, які використано при оптимізаційному геометричному профілюванні корпусу пневмокласифікатора і при визначенні режимно-технологічних параметрів процесу.

4. Експериментально визначено швидкості витання сипких сумішей різноманітних матеріалів, що дало можливість визначити співвідношення швидкості витання частинок основного матеріалу до частинок домішок, і відповідно прогнозувати ефективність розділення сипких сумішей.

5. Визначені оптимальні параметри швидкості та витрати газового потоку, в межах яких втрати товарної фракції зменшуються.

6. Визначені оптимальні параметри дозавантаження і розвантаження «подушки» матеріалу, на основі яких отримане рівняння, що показує залежність часу дозавантаження від відношення крупної фракції частинок до дрібної фракції частинок.

7. Проведене співставлення результатів експерименту та математичного моделювання процесу. Визначено та проаналізовано вплив витрати газового потоку та часу дозавантаження і розвантаження матеріалу на ефективність процесу пневмокласифікації.

8. Розроблено методику інженерного розрахунку гідродинамічних параметрів процесу пневмокласифікації.

9. Запропоновано нові корисні моделі–спосіб пневмокласифікації сипких матеріалів та пристрій для пневмокласифікації сипких матеріалів, а також винахід – спосіб пневмокласифікації сипких матеріалів у вертикальному висхідному повітряному потоці і пристрій для його здійснення, які захищені патентами України.

10. Проведено впровадження отриманих наукових результатів та практичних рекомендацій при виконанні держбюджетних тем (2010-2014 рр., 2015-2019 рр.) та господарсько-договірних проектів (1 акт впровадження).

ОСНОВНІ УМОВНІ ПОЗНАЧЕННЯ

a, n – експериментальні сталі; D_K – мінімальний розмір частинок крупної фракції, мм; D_d – мінімальний розмір частинок дрібної фракції, мм; d_{cpk} – середній розмір крупної фракції; ψ – коефіцієнт форми частинки; g – прискорення вільного падіння, м/с²; $D_{\text{э}}$ – еквівалентний діаметр каналу, м; $\Delta\rho$ – відношення густин газу зовні і всередині каналу; W_r – швидкість газової фази; m_r – маса газового компонента, кг; P_r – масова сила, діюча на газоподібний компонент, Н/м; $F_{трr}$ – сили тертя газового потоку об стінки апарату, Н/м;

S - площа поперечного перетину каналу, m^2 ; θ - кут розкриття ромбу, град; d_0 - початковий перетин апарату, м; B - довжина перетину каналу, м; m_T - маса твердої частинки, кг; U_T - швидкість твердої частинки, м/с; S_T - площа міделевого перетину шароподібної частинки, m^2 ; α - кут нахилу стінок каналу; k - відношення площі міделевого перетину частинки до її об'єму, m^2/m^3 ; $G_{сл}$ - маса частинок в зваженому шарі, кг; $C_M(\tau)$ - поточна концентрація частинок дрібної фракції в зваженому стані, кг/кг; C_M^* - гранична концентрація частинок дрібної фракції в зваженому стані, кг/кг; τ - час проходження процесу пневмокласифікації, с; K_y - константа швидкості винесення, 1/с.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ РОБІТ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Литвиненко А.В. Пневматическая классификация зернистых материалов / А.В. Литвиненко, В.А. Смирнов, Н.П. Юхименко // Збірник наукових праць: «Наукові праці Одеської національної академії харчових технологій». – 2012. – Т.2, Вип. 41. – С. 238-242. *Особистий внесок: проведено аналіз і вибір кутів проточної частини пневмокласифікатора, що підтверджено теоретично і експериментально.*

2. Литвиненко А.В. Пневматическая классификация зернистых материалов / А.В. Литвиненко, Н.П. Юхименко // Сборник научных трудов SWorld. «Современные направления теоретических и прикладных исследований 2013». – Вып. 1. Т.7. –2013. – С.63-67. *Особистий внесок: проведено аналіз існуючих конструкцій пневмокласифікаторів, запропонована нова форма корпусу, та проведено аналіз отриманих експериментальних даних.*

3. Литвиненко А.В. Дослідження швидкості витання полідисперсних матеріалів для визначення здатності їх розділення у пневмокласифікаторі / А.В. Литвиненко, Н.П. Юхименко // Журнал інженерних наук. – 2014. – № 3. – С. В9 - В13. *Особистий внесок: проведено аналіз впливу швидкості витання на процес розділення різних сипких матеріалів, а також розглянута методика і стенд для проведення експериментів.*

4. Острога Р.О. Технология получения гранулированных удобрений на органической основе / Р.О. Острога, Н.П. Юхименко, Михайловский Я.Э. А.В. Литвиненко // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. Серия: Технологии органических и неорганических веществ. – 2016. – № 1/6 (79). – С. 19-26. *Особистий внесок: розроблено технологічну схему установки безперервної дії для отримання гранул на органічній основі.*

5. Литвиненко А.В. Pneumatic classification of the granular materials / А.В. Литвиненко, Н.П. Юхименко // E-Journal - Modern scientific research and their practical application. Vol. J21310-045, — 2013. — P.228-232. *Особистий внесок: проведено аналіз фізичної моделі роботи пневмокласифікатора.*

6. Литвиненко А.В. Pneumatic Classification Of The Granular Materials In The “Rhombic”Apparatus / А.В. Литвиненко, Н.П. Юхименко // Journal of Manufacturing and Industrial Engineering (JMIE). – 2014. – Vo 1 -2. pg. 1 – 3.

Особистий внесок: проведено аналіз роботи «ромбічного» пневмокласифікатора та проведено аналіз отриманих експериментальних даних при роботі з ним.

7. Литвиненко А.В. Математическая модель гидродинамики движения двухфазного восходящего потока в пневмокласификаторах переменного сечения / А.В. Литвиненко, Н.П. Юхименко // Вестник НТУ «ХПИ», Серия: Новые решения в современных технологиях. – Харьков: НТУ «ХПИ». – 2016. – № 25 (1197). – С. 113-118. *Особистий внесок: розроблено математичну модель, що описує гідродинаміку двофазного висхідного потоку в пневмокласифікаторах змінного перетину.*

8. Пат. на корисну модель №91616 Україна, Пристрій для пневмокласифікації сипких матеріалів / М.П. Юхименко, А.В. Литвиненко // МПК (2006.01) В07В 4/02 (2006.01); Заявлено 14.02.2014; Надрук. 10.07.2014, Бюл. №3, 2014. *Особистий внесок: розробка ідеї корисної моделі, підготовка матеріалів до подачі заявки.*

9. Пат. на корисну модель №93492 Україна, Спосіб пневмокласифікації сипких матеріалів / М.П. Юхименко, А.В. Литвиненко // МПК (2006.01) В07В 4/02 (2006.01); Заявлено 14.02.2014; Надрук. 10.10.2014, Бюл. №19, 2014. *Особистий внесок: розробка ідеї корисної моделі, підготовка матеріалів до подачі заявки.*

10. Патент на винахід № 108529 Україна, Спосіб пневмокласифікації сипких матеріалів у вертикальному висхідному повітряному потоці і пристрій для його здійснення / М.П. Юхименко, А.В. Литвиненко // МПК (2006.01) В07В 4/02 (2006.01); Заявлено 22.07.2013; Надрук. 12.05.2015, Бюл. №9, 2015. *Особистий внесок: розробка ідеї способу пневмокласифікації та ідеї пристрою, підготовка матеріалів до подачі заявки.*

11. Литвиненко А.В. Класифікатори для розділення зернистих матеріалів / А.В. Литвиненко, В.А. Смірнов, І.В. Міхалевич // Сучасні технології в промисловому виробництві : матеріали Всеукраїнської міжвузівської науково-технічної конференції (Суми, 19 - 23 квітня 2010 року) / Редкол.: О.Г. Гусак, В.Г. Євтухов. - Суми : СумДУ, 2010. - Ч.І. - С. 150. *Особистий внесок: проведення досліджень ефективності роботи пневматичного класифікатора.*

12. Литвиненко А.В. Пневматическая классификация / А.В. Литвиненко, Н.П. Юхименко // Хімічна технологія: наука та виробництво: I Міжнародна науково-технічна конференція, м. Шостка, 07 – 09 листопада 2012 р.: тези доповідей. – Суми: СумДУ, 2012. – С. 46. *Особистий внесок: проведення аналізу ефективності використання пневмокласифікаторів.*

13. Литвиненко А.В. Класифікатори для розділення та пневмобогачення зернистих матеріалів / А.В. Литвиненко, М.П. Юхименко // Сучасні технології в промисловому виробництві: матеріали II Всеукраїнської міжвузівської науково-технічної конференції, м. Суми, 17-20 квітня 2012 р.: у 3-х ч. / Ред.кол.: О.Г. Гусак, В.Г. Євтухов. - Суми : СумДУ, 2012. - Ч.2. - С. 154. *Особистий внесок: проведено аналіз основних механізмів роботи пневмокласифікаторів.*

14. Литвиненко А.В. Особенности фракционирования порошкообразных материалов в пневмокласификаторе / А.В. Литвиненко, Н.П. Юхименко, Н.А. Кочергин // Технологія-2013: матеріали міжнар.наук.-техн. конф., 26-27 квіт. 2013 р., м. Сєверодонецьк. / Східноукр. нац. ун-ту ім. В. Даля (м. Сєверодонецьк), 2013. – Ч. II – ст. 30 – 32. *Особистий внесок: проведені дослідження розділення сипких матеріалів в пневмокласифікаторі.*

15. Литвиненко А.В. Исследования качества разделения пневматического классификатора / А.В. Литвиненко, Н.П. Юхименко // Сучасні технології в промисловому виробництві: матеріали науково-технічної конференції викладачів, співробітників, аспірантів і студентів факультету технічних систем та енергоефективних технологій.— Суми: Вид-во СумДУ, 2013. — Ч.2. — С.140. *Особистий внесок: проведені співставлення результатів розділення в різних корпусах пневмокласифікаторів.*

16. Литвиненко А.В. Оптимизация проточной части пневмокласификатора / А.В. Литвиненко, Н.П. Юхименко, О.В. Остапенко // Сучасні технології в промисловому виробництві: матеріали науково-технічної конференції викладачів, співробітників, аспірантів і студентів факультету технічних систем та енергоефективних технологій.— Суми: Вид-во СумДУ, 2013. — Ч.2. — С.146. *Особистий внесок: проведено аналіз проточних частин різних моделей пневмокласифікаторів.*

17. Литвиненко А.В. Дослідження процесу розподілу сипких матеріалів з використанням інгібіторів на лабораторній моделі поличного класифікатора / А.В. Литвиненко, В.Я. Стороженко, В.А. Смірнов, Н.А. Савченко // Сучасні технології в промисловому виробництві: матеріали науково-технічної конференції викладачів, співробітників, аспірантів і студентів факультету технічних систем та енергоефективних технологій. — Суми: Вид-во СумДУ, 2013. — Ч.2. — С.151. *Особистий внесок: проведені дослідження якості розділення сипких матеріалів з використанням інгібіторів.*

18. Литвиненко А.В. Пневматическая классификация / А.В. Литвиненко, Н.П. Юхименко // International Scientific Journal Acta Universitatis Pontica Euxinus. Материалы IX Международной конференции «Стратегия качества в промышленности и образовании». — Болгария, Варна, 2013. — Т.1. — С.75-78. *Особистий внесок: проведені дослідження якості розділення сипких матеріалів і аналіз результатів розсівів.*

19. Литвиненко А.В. Порівняльна характеристика пневмокласифікаторів зернистих матеріалів / А.В. Литвиненко, М.П. Юхименко, Н.А. Савченко // Сучасні технології у промисловому виробництві: III Всеукраїнська міжвузівська науково-технічна конференція, м. Суми, 22 – 25 квітня 2014 р.: тези доповідей. – Суми: СумДУ, 2014. – Ч. 2. – С. 84. *Особистий внесок: проведено аналіз та порівняння роботи пневмокласифікаторів із контактними пристроями та без контактних пристроїв.*

20. Литвиненко А.В. Особливості роботи «ромбічного» пневмокласифікатора / А.В. Литвиненко, М.П. Юхименко // Сучасні технології у промисловому виробництві: III Всеукраїнська міжвузівська науково-технічна конференція, м. Суми, 22 – 25 квітня 2014 р.: тези доповідей. – Суми: СумДУ,

2014. – Ч. 2. – С. 89. *Особистий внесок: проведені дослідження якості розділення сипких матеріалів в «ромбічному» пневмокласифікаторі.*

21. Литвиненко А.В. Особливості роботи «ромбічного» пневмокласифікатора із бінарною сумішшю і сумішшю із трьох компонентів / А.В. Литвиненко, М.П. Юхименко, Д.В. Крісанова// Сучасні технології у промисловому виробництві: матеріали науково-технічної конференції викладачів, співробітників, аспірантів і студ. фак-ту технічних систем та енергоефективних технологій (м. Суми, 14-17 квітня 2015 р.) / Редкол.: О Г. Гусак, В.Г. Євтухов. - Суми : СумДУ, 2015. - Ч.2. - С. 111. *Особистий внесок: проведені дослідження якості розділення бінарних сипких сумішей та сумішей, які містять три компоненти в «ромбічному» пневмокласифікаторі.*

АНОТАЦІЯ

Литвиненко А.В. Класифікація та пневмозбагачення сипких сумішей у гравітаційному пневмокласифікаторі. – Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.17.08 – процеси та обладнання хімічної технології. – Сумський державний університет МОН України, Суми, 2017.

Дисертаційну роботу присвячено моделюванню процесів класифікації та пневмозбагачення сипких сумішей у гравітаційному пневмокласифікаторі ромбічної форми, встановленню оптимальних режимних і конструктивних параметрів пневмокласифікатора, створенню методики інженерного розрахунку апарату для пневмокласифікації сипких сумішей різноманітних матеріалів. Експериментально визначено оптимальні параметри швидкості та витрати газового потоку, час дозавантаження і розвантаження завислого шару матеріалу в робочому об'ємі апарату. Запропоноване рівняння, що показує залежність часу дозавантаження від відношення мінімального розміру крупної фракції частинок до мінімального розміру дрібної фракції частинок. Також експериментально визначено швидкості витання частинок і ефективність пневмокласифікації сипких сумішей різноманітних матеріалів. Проведено математичне моделювання гідродинаміки руху двохфазного потоку та процесів класифікації сипких сумішей, за допомогою якого отримано основні розрахункові залежності, що визначають швидкості руху газового потоку та одиночної частинки сипкого матеріалу та при їх взаємодії, а також ефективність вилучення дрібної або крупної фракції з суміші сипкого матеріалу.

Проведені математичні розрахунки підтверджуються результатами експериментальних досліджень, що доводить адекватність математичної моделі стосовно розрахунку процесів пневматичної класифікації. Розроблено методику інженерного розрахунку гідродинамічних параметрів процесу пневмокласифікації. Запропоновані та захищені патентом України на винахід спосіб та пристрій для пневмокласифікації сипких матеріалів. Основні наукові результати дисертаційної роботи впроваджено в виробництво.

Ключові слова: *пневмокласифікації, очищення, фракція, газодисперсний потік, моделювання, розділення.*

АННОТАЦИЯ

Литвиненко А.В. Классификация и пневмообогащение сыпучих смесей в гравитационном пневмоклассификаторе. – Рукопись.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.17.08 – процессы и оборудование химической технологии. – Сумский государственный университет МОН Украины, Сумы, 2017.

Диссертационная работа посвящена моделированию процессов классификации и пневмообогащения сыпучих смесей в гравитационном пневмоклассификаторе ромбической формы, установлению оптимальных режимных и конструктивных параметров пневмоклассификатора, созданию методики инженерного расчета аппарата для пневмоклассификации сыпучих смесей различных материалов.

Разработана физическая модель процесса пневмоклассификации сыпучих смесей в аппарате ромбической формы, которая объясняет условия разделения сыпучих смесей на отдельные фракции, формирование взвешенного слоя материала, а также циклический механизм дозагрузки и разгрузки взвешенного слоя.

Экспериментально определены оптимальные параметры скорости и расхода газового потока, время дозагрузки и разгрузки зависшего слоя материала в рабочем объеме аппарата. Предложено уравнение, показывающее зависимость времени дозагрузки от отношения минимального размера крупной фракции частиц до минимального размера мелкой фракции частиц. Также экспериментально определены скорости витания частиц и эффективность пневмоклассификации сыпучих смесей различных материалов.

Проведено математическое моделирование гидродинамики движения двухфазного потока и процессов классификации сыпучих смесей, с помощью которого получены основные расчетные зависимости, определяющие скорости движения газового потока и одиночной частицы сыпучего материала и при их взаимодействии, а также эффективность извлечения мелкой или крупной фракции из смеси сыпучего материала. Проведенные математические расчеты подтверждаются результатами экспериментальных исследований, что доказывает адекватность математической модели расчетов процессов пневматической классификации. Разработана методика инженерного расчета гидродинамических параметров процесса пневмоклассификации. Проведены сравнения основных типов пневмоклассификаторов на основании показателей – границы разделения и эффективности уноса мелкой фракции, которые показали более высокую эффективность пневмоклассификатора «ромбической» формы по сравнению с другими конструкциями аппаратов.

Предложены и защищены патентом Украины на изобретение способ и устройство для пневмоклассификации сыпучих материалов. Основные научные результаты диссертационной работы внедрены в производство.

Ключевые слова: *пневмоклассификация, очистки, фракция, газодисперсный поток, моделирование, разделение.*

ABSTRACT**Lytvynenko A.V. *Classification and Pneumatic Separation of the Bulk Mixtures in the Gravitational Pneumatic Classifier.- Synopsis.***

The dissertation for the degree of Ph.D. in Engineering Science, specialty 05.17.08 Processes and Equipment of Chemical Technology. –Sumy State University, Sumy, 2017.

The dissertation is devoted to modeling of the classification processes and pneumatic separation of bulk mixtures in a gravitational pneumatic classifier of a rhombic shape; determining of the best operating conditions and design parameters of pneumatic classifiers; developing engineering calculation of the apparatus for pneumatic classification of the different bulk substances.

One has experimentally determined the best parameters of velocity and gas flow consumption, the time of additional loading and discharge of the substance suspended layer in the working volume of the device. There is proposed an equation, which shows the dependence of the additional loading time on the proportion of minimal size of the coarse fraction to the minimal size of the fine fraction. One has also experimentally determined the velocity of particles hovering and efficiency of pneumatic classification of different substances.

There has been performed a mathematical modeling of hydrodynamic motion of two-phase flow and classification processes of bulk mixtures by which one has received basic calculation dependences, which determine velocity of the gas flow and a single particle of bulk substance and their interaction as well as efficiency of the removal of fine or coarse fraction from the mixture of bulk material.

Mathematical calculations are confirmed by experimental results, which proves the adequacy of the mathematical model for calculation of pneumatic classification processes. One has developed the methodology for engineering calculation of hydrodynamic parameters of the pneumatic classification process.

The proposed device and classification method of carrying out the pneumatic classification are protected by the patent of Ukraine for invention. The main scientific results of the dissertation have been put into production.

Keywords: pneumatic classification, depuration, fraction, gas-disperse flow, modelling, separation.

Підписано до друку 13.01.2017 р.
Формат 60x84/16. Ум. друк. арк. 1,1. Обл.-вид. арк. 0,9. Тираж 100 пр. Зам. № 69.

Видавець і виготовлювач
Сумський державний університет,
вул. Римського-Корсакова, 2, м. Суми, 40007
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи ДК № 3062 від 17.12.2007 р.