

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

На правах рукопису

ЛИТВИНЕНКО АНДРІЙ ВОЛОДИМИРОВИЧ

УДК 66.074-911.69:66.022.62(043.5)

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

05.17.08 – процеси та обладнання хімічної технології

Дисертація на здобуття наукового ступеня

кандидата технічних наук

Науковий керівник:

кандидат технічних наук, доцент

Юхименко Микола Петрович

СУМИ – 2017

ЗМІСТ

ВСТУП.....	4
РОЗДІЛ 1 ЛІТЕРАТУРНИЙ ОГЛЯД І ПОСТАНОВКА ЗАВДАНЬ ДОСЛІДЖЕНЬ.....	9
1.1 Сучасні методи та обладнання для розділення сипких матеріалів.....	9
1.2 Закономірності розділення сипких сумішей у пневмокласифікаторах...	16
1.3. Теоретичні закономірності руху двофазних потоків в сепараційному каналі пневмокласифікаторів.....	21
1.4 Сили, що діють на частинку в газовому потоці.....	30
Висновки до першого розділу. Постановка задач досліджень.....	32
РОЗДІЛ 2 ХАРАКТЕРИСТИКА ОБ’ЄКТІВ ДОСЛІДЖЕННЯ ТА МЕТОДИКИ ПРОВЕДЕННЯ ЕКСПЕРИМЕНТІВ	34
2.1 Характеристика пісочної суміші	34
2.2 Експериментальна установка для пневматичної класифікації.....	36
2.3 Методики дослідження гідродинамічних закономірностей, пневматичної класифікації та кінетики руху частинок в апараті.	39
2.4 Методика дослідження часу завантаження фракції в апарат та підпитки шару матеріалу. Кінетика руху частинок в апараті.	41
2.5 Методика дослідження ефективності класифікації.....	41
2.6 Методика дослідження швидкості витання полідисперсних систем для аналізу можливостей роботи апарату з різними матеріалами.....	42
2.7 Оцінка похибок вимірювання.....	44
Висновки до другого розділу	47
РОЗДІЛ 3 ФІЗИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ТА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ГІДРОДИНАМІКИ ДВОФАЗНОГО ПОТОКУ ТА ЕФЕКТИВНОСТІ ПРОЦЕСУ ПНЕВМОКЛАСИФІКАЦІЇ НА МОДЕЛІ РОМБІЧНОГО ПНЕВМОКЛАСИФІКАТОРА	48
3.1 Фізична модель гідродинаміки двофазного потоку	48
3.1.2 Фізична модель процесу пневмокласифікації.....	54

3.2 Гідродинаміка однофазного потоку	59
3.3 Дослідження швидкості витання полідисперсних матеріалів	63
3.4 Дослідження процесу класифікації	66
3.4.1 Дослідження впливу витрати газового потоку на якість розділення .	66
3.4.2 Аналіз впливу часу дозавантаження і розвантаження обертаючого шару матеріалу на якість розділення	69
3.4.3 Оцінка ефективності пневмокласифікації різних матеріалів	72
Висновки до третього розділу.....	78
РОЗДІЛ 4 МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ГІДРОДИНАМІКИ РУХУ ГАЗОДИСПЕРСНОГО ПОТОКУ ТА ПРОЦЕСУ ПНЕВМОКЛАСИФІКАЦІЇ .	79
4.1 Гідродинаміка руху однофазного потоку	80
4.2 Гідродинаміка руху окремої частинки у газовому потоці	90
4.3 Гідродинаміка руху двофазних потоків.....	94
4.4 Закономірності процесу пневмокласифікації.....	104
Висновки до четвертого розділу.....	110
РОЗДІЛ 5 УЗАГАЛЬНЕННЯ ТА ВИКОРИСТАННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕНЬ РОМБІЧНОГО ПНЕВМОКЛАСИФІКАТОРА.....	112
5.1 Аналіз та співставлення результатів експериментальних досліджень та математичного моделювання.....	112
5.1.1 Співставлення результатів гідродинаміки однофазного потоку.....	112
5.1.2 Співставлення результатів ефективності розділення.....	114
5.2 Методика розрахунку пневмокласифікатора	116
5.3 Порівняння основних типів пневмокласифікаторів	120
5.4 Використання пневмокласифікатора у промисловості	122
Висновки до п'ятого розділу.....	126
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ	128
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	130
ДОДАТКИ	

ВСТУП

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 багатофакторного 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.); ІХ Міжнародній конференції «Стратегія якості в промисловості та освіті» (м. Варна, Болгарія, 2013р.); міжнародній науково-технічній конференції «Технологія-2013» (м. Сєверодонецьк, 2013 р.); ІІІ Всеукраїнській міжвузівській науково-технічній конференції «Сучасні технології у промисловому виробництві» (м. Суми, 2014р.); ІV 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.

РОЗДІЛ 1

ЛІТЕРАТУРНИЙ ОГЛЯД І ПОСТАНОВКА ЗАВДАНЬ ДОСЛІДЖЕНЬ

1.1 Сучасні методи та обладнання для розділення сипких матеріалів

На теперішній час існує багато видів різних конструкцій пневматичних класифікаторів, які відрізняються принципом дії, своєю конструкцією, продуктивністю, розділовою здатністю, характером руху потоків і якістю одержуваного продукту.

У промисловості знайшли застосування традиційні методи розділення, такі як пневматичні, гідравлічні і механічні.

Механічний метод включає в себе розсів матеріалів на ситах і грохочення. Грохочення застосовують для великих частинок, які мають геометричні розміри більше 1 мм. Частинки, в процесі руху уздовж поверхні сита, просіваються через нього, і потрапляють на наступне сито, і так поки матеріал що розділяється не пройде весь блок сит, що мають різні діаметри отворів.

Такий метод є найдешевшим і простим у виконанні, проте він не позбавлений і своїх недоліків, таких як мала ефективність, шум, запиленість, забруднення надрешітчастої фракції і знос сит.

При збагаченні корисних копалин і в гірничорудній промисловості широко використовується метод гідравлічної класифікації. Але використання даного методу несе безліч обмежень, сировина буде змочуватись, що викличе потреби у додаткових витратах на сушку, а також витрати для утилізації шламових вод, які утворюються в процесі класифікації, високі енерговитрати, і велика витрата води.

Пневматична класифікація заснована на різниці швидкостей витання частинок різних фракцій в потоці повітря. Цей метод позбавлений багатьох недоліків, властивих механічній та гідравлічній класифікації, і має певні переваги. Пневмокласифікація на відміну від механічної класифікації, дозволяє

розділяти вихідний матеріал на фракції за сукупністю фізико-механічних властивостей частинок: розмірами, формою, шорсткістю поверхні і щільністю. У порівнянні з гідравлічною класифікацією пневматичний метод розділення дозволяє отримувати продукти в сухому вигляді, що знижує енергоємність проведення технологічних процесів. Ці відмітні ознаки сприяють поширенню пневматичної класифікації в різних галузях промисловості.

Велике розмаїття апаратів для пневматичної класифікації представлене в різних галузях промисловості, але всі вони умовно діляться на групи по ряду різних ознак. Р.Нагель [1] представляє найбільш повну класифікацію пневматичних класифікаторів, основу якої складають співвідношення сил опору, обумовлених рухом потоку, і масових, таких як гравітаційні, інерційні і відцентрові. Найбільше значення в цьому випадку має сила інерції. Однак інші автори [2] після аналізу дійшли висновку, що основним силам, таким як масові й інерційні, протиставляється сила опору середовища.

Наступною ознакою класифікації апаратів для знепилювання й класифікації в повітряному потоці, а також із застосуванням сит, являється схема напрямку потоків, яка виділяє дві підгрупи: апарати які працюють за принципом протитечії і відцентрових сил, без підняття матеріалу повітряним потоком.

Автор К. Лешонській [3] ділить класифікатори на групи, залежно від різних чинників, присутніх в процесі: поля течії, швидкості течії, сил які залежать від маси частинок, напрямку потоків в апараті та подачі матеріалу в апарат.

У роботах М.Д. Барського [4] запропонована більш проста класифікація. Він пропонує розділяти апарати на три групи - гравітаційні, відцентрові і лінійно-інерційні. Широко використовуються апарати гравітаційні і відцентрові, лінійно-інерційні майже не знайшли собі застосування, так як матеріал що розділяється має широкий діапазон фракцій і не дозволяє чітко забезпечити границю розділення. Відцентрові класифікатори були достатньо вивчені і розглянуті в роботах [5-14]. Вони знайшли застосування при поділі

високодисперсних матеріалів, з розміром частинок від 10 до 100 мкм [7, 8, 15-19]. Але ефективність даних апаратів дуже низька, так як безпосередньо залежить від продуктивності, при цьому крупний продукт сильно забруднений домішками дрібного продукту. До їх недоліків відноситься складна конструкція, обертові частини і їх підвищений знос, а також металоємність.

Гравітаційні класифікатори також можна розділити на групи по ряду різних ознак. У роботах [20] запропоновано до розгляду апарати металюної дії, які бувають з висхідним потоком повітря, з направленим горизонтально потоком повітря і багатоступінчасті. А автори Є.В. Донат і А.І. Голобурдін [21] за конструктивними відмінностями даних апаратів виділяють три їх типи, з поличними контактами, з псевдозрідженим шаром і вільного перетину. Н.І. Зверев і С.Г. Ушаков [2] класифікують дані апарати на зигзагоподібні, протитечійні, горизонтальні і підйомні. Класифікацію на чотири групи представлено в роботах [4]: каскадні, протитечійні, поворотні і поперечно-потоківі. М.Д. Барський приводить найбільш повну класифікацію принципів роботи, областей застосування і недоліків даних апаратів. Дана класифікація є найбільш повною на сьогоднішній день, так як вміщує в себе всі різновиди апаратів для пневматичної класифікації, в тому числі представлені іншими вченими. Наприклад до каскадних апаратів відносяться поличні і зигзагоподібні апарати. Поперечно-потоківі класифікатори включають в себе апарати з косими потоками, а поворотні включають в себе металюні. Підйомні апарати, апарати з псевдозрідженим шаром, з висхідним потоком, з вільним перетином утворюють протитечійні гравітаційні апарати.

Прості по своїй конструкції поперечно-потоківі апарати [22], але не дивлячись на простоту конструкції можуть забезпечувати значну продуктивність. Класифікація на фракції в таких апаратах відбувається в газовому потоці, направленим горизонтально. Матеріал, що розділяється, завантажують у верхню частину апарату, де він підхоплюється повітряним горизонтальним потоком, і підхоплені частинки переміщаються уздовж потоку, і випадають на дно апарату. Кожна частинка проходить свою відстань перш ніж

випасти з потоку, це обумовлено розміром частинок і дією результуючої сили, що впливає на кожен частинку. Відповідно більш великі частинки проходять меншу відстань, ніж дрібніші. У днищі апарату встановлені бункери для збору випадючих з потоку частинок, і відповідно вони розташовані на різній відстані від точки введення. Враховуючи вплив швидкості потоку, концентрації крупної фракції в суміші, а також відстані на якій розташовані бункери в днищі, можна впливати на проходження процесу, що дозволяє отримувати фракцію з потрібною граничною крупністю. Проте основним недоліком даного виду класифікаторів, є нечітке значення межі розділення, яка змінюється в дуже широких межах, що знижує ефективність даної конструкції. При русі суміші по потоку, частинки співударяються між собою, передаючи одна одній енергію, що призводить до забивання крупною фракцією дрібної, що в кінцевому результаті впливає на якість кінцевого продукту.

Порівнюючи поворотні апарати [2, 21] з поперечно-потоківими, видно значне збільшення продуктивності та ефективності, на користь других. Введення суміші матеріалу в апарат відбувається при певній швидкості, яка в сукупності зі швидкістю руху потоку повітря в апараті, дозволяє досягти необхідного кордону розділення. Сепараційний канал в таких апаратах розташований під кутом до горизонту. Така конструкція дозволяє виключати скупчення матеріалу в місці його введення, а також направляє дрібні частинки до місця їх виведення з апарату. Висхідний потік повітря піднімає дрібні частинки у верхню частину апарату, з якої вони відводяться, а великі частинки осаджує в нижню частину апарату. До недоліків даних апаратів відноситься налипання пилу на стінках апарату, нерівномірний розподіл локальних швидкостей в сепараційному каналі, неможливість повністю зруйнувати клубки частинок, що утворюються в процесі класифікації.

З достатньою ефективністю працюють протитечійні пневматичні класифікатори [2, 7, 8, 22]. В основному такі апарати знайшли застосування при роботі разом із молотковими млинами, а також у вигляді охолоджувачів [24] і пневмотранспорту. Апарат виконаний у вигляді вертикальної порожнистої

шахти, у верхній частині якої знаходиться патрубок, встановлений під кутом, через який здійснюється подача матеріалу в корпус. Повітряний потік надходить в корпус апарату через нижню частину. Однак подальші дослідження показали, що проводити теплообмінні процеси в таких апаратах малоефективно, так як час для фазового контакту дуже незначний, а також незначний і час перебування матеріалу в корпусі апарату. Щоб уникнути проблем із взаємодією фаз, почали застосовувати конструкції каналу із ділянками, які розширюються та звужуються, а також з зигзагоподібними ділянками [4]. Для більш рівномірного розподілу матеріалу в перетині каналу, і для виключення утворень агломератів застосовують різного виду розсікачі [24], і різні за конструкцією вставки [21, 25-27], проте зі збільшенням розмірів прохідного перетину труби (шахти) істотно викривляється поле швидкостей, головним чином внаслідок впливу місцевих опорів на вході і виході з шахти, які не можна усунути збільшенням відносної довжини каналу, бо габарити апарату в цьому випадку становляться неприйнятними.

Широке застосування в промисловості знайшли пневмокласифікатори з киплячим шаром [24, 28-35]. У даних апаратах на похилих решітках час контакту фаз значно збільшується, в порівнянні з протитечійними класифікаторами. Застосування даних апаратів вивчалось авторами [21]. На їхню думку гідродинамічні і тепломасообмінні процеси є оптимальною сферою застосування даних апаратів. У даних апаратах поділ частинок здійснюється по висоті псевдозрідженого шару, а також над ним [36-37]. Конструктивно апарат складається з шахти, в нижній частині якої встановлена газорозподільна решітка, живий перетин якої 5-10% [28, 38]. Варіюючи розміром живого перетину, в апараті реалізуються різні режими роботи, що впливають на взаємодію повітряного потоку з частинками. При проходженні повітряного потоку через перфорацію решітки, збільшується його несуча здатність, оскільки збільшується швидкість потоку в момент проходження через отвори решітки. Матеріал піднімається над решітками, що впливає на порізність в прирешіточному шарі. Однак для забезпечення повноти виходу тонкого

продукту дрібні частинки повинні "встигнути" досягти верхньої межі шару (ускладнене переміщення через нього із-за високої концентрації частинок), для чого має бути забезпечено достатній час перебування частинок в шарі або відповідно невелика висота шару. Те й інше знижує продуктивність і призводить до збільшення габаритів апарату.

Модернізація вертикального каналу апарату пересипними полицями або додатковими решітками [21, 39] дозволяє реалізувати каскадний принцип розділення. Матеріал розподіляється більш ефективно по перетину корпусу, через виникнення вихорів на кожному ступені каскадів. Прикладом каскадного класифікатора є зигзаг Кайзера [21, 40-41] в якому за рахунок повороту потоку газу виникають відцентрові сили і починається циркуляція частинок, а також він дозволяє реалізувати в одному корпусі процес каскадної класифікації. Апарат має форму порожнистої вертикальної шахти, що складається з зигзагоподібних секцій. Введення матеріалу відбувається через похилий патрубок, розташований в середині корпусу, і продувається повітряним потоком, який надходить із нижньої частини апарату. Оптимальною зоною розділення частинок є вигини каналу. Через різкі повороти потоку, в каналі утворюються вихори, які при обертанні навколо своєї осі втягують у себе частинки матеріалу. Потік матеріалу при проходженні вихору ділиться на дві частини, на більш легку і більш важку, які вихором відхиляються в різні боки. Частинки контактують зі стінками каналу, і в пристінковій зоні, більш великі частинки потрапляють в зону слабкої швидкості, і падають вниз, а більш дрібні навпаки потрапляють в струмінь розігнаного повітря і виносяться вгору. Якість розділення збільшується при проходженні матеріалом вигнутих каналів у кожній зоні апарату. На проходження процесу і якість товарної фракції в даних апаратах впливає концентрація матеріалу, швидкість повітря і число секцій апарату.

М.Д. Барський [20] беручи до уваги дослідження Ф. Кайзера, запропонував нові принципи раціональної організації процесу гравітаційної класифікації і розробив їх фізичні основи. Основна суть цих принципів полягає

в несталому режимі руху газосуспензії, що досягається розміщенням всередині сепараційного каналу апарату каскаду контактних елементів. Перспективність каскадної пневмокласифікації, організованої в обсязі одного апарату, підтверджена автором при використанні в якості контактних елементів похилих суцільних пластинчастих полиць. Запропонований апарат є більш простим по конструкції, і включає в себе вертикальну шахту прямокутного перетину, в якій в шаховому порядку розташовані похилі контактні елементи у вигляді полиць, а в нижній частині апарату розташована газорозподільна решітка, на яку і подається вихідний матеріал, а повітря подається під решітку і піднімає матеріал в канал. Крупна фракція рухаючись по решітці, очищається від дрібних домішок, і виводиться з апарату, а дрібна фракція проходячи через похилі полки очищається, і далі виводиться в циклон, в якому і осідає.

З метою підвищення ефективності процесу розділення сипучих матеріалів і розширення області його використання подальше удосконалення каскадних пневмокласифікаторов йде в основному в бік створення нових контактних елементів [42-55], комбінування різних типів апаратів в корпусі одного апарату [56], установки додаткових перемішувальних елементів в зоні розділення [57-63]. Однак контактні елементи, являють собою своєрідні місцеві опори при русі висхідного повітряного потоку, що впливає на енергоємність апарату. Чим більше кількість полиць в апараті, тим інтенсивніше контакт фаз, але збільшується гідравлічний опір і відповідно енерговитрати.

Розглянувши всі позитивні і негативні сторони даних рішень, автори [62] запропонували робити перфорацію поверхні контактів з метою зменшення гідравлічного опору апаратів.

Більшість розглянутих апаратів дозволяють проводити процес розділення матеріалу на дві фракції, по різниці швидкостей витання крупної та дрібної фракції, а деякі апарати [64-66] дозволяють відбирати фракції по висоті апарату, і отримувати різні за крупністю фракції. Для цього їх забезпечують додатковими уловлювачами, полицями та відбійниками. Але в результаті

ефективність таких апаратів досить низька, межі розділення матеріалу змінюються в широких межах, що знижує якість одержуваних фракцій.

В роботі [4] запропоновано поєднати між собою різні види апаратів по потокам і чистоті готових продуктів, які в них одержуються. При цьому вони працюють як один багатоступінчастий класифікатор, тільки кожен має свій певний режим роботи. Однак недоліком таких установок буде їхня низька ефективність, значні витрати енергії і габарити.

Таким чином аналіз існуючих видів апаратів для розділення сипучих матеріалів, показує що найбільш раціональними конструкціями є гравітаційні пневматичні класифікатори, за умови їх подальшого розвитку, в бік зменшення металоємності, енергоємності, а також зменшення гідравлічного опору і збільшення чіткості кордону розділення.

1.2 Закономірності розділення сипких сумішей у пневмокласифікаторах

Засновником систематичного викладення наукових основ гравітаційного збагачення визнаний П.Р. Ріттінгер [22,67]. П.Р. Ріттінгер створив теорію процесу і отримав основні рівняння, що описують рух мінерального зерна в воді. Автором отримане рівняння для розрахунку пройденої відстані рівномірно падаючою в воді частинкою певним діаметром і щільністю за певний час.

П.Р. Ріттінгер також ввів уявлення про умовний діаметр частинок неправильної форми і запропонував враховувати поправочні коефіцієнти при розрахунку швидкостей осадження подібних тіл. Основні закономірності осадження твердих частинок виявлені П.Р. Ріттінгером:

- найбільшу швидкість осадження мають більш крупніші і щільніші частинки;
- швидкість осадження частинок знижується зі збільшенням в'язкості і щільності середовища;

- на швидкість осадження частинок істотно впливає їх форма і стан поверхні. При рівній масі частинок найменший опір з боку середовища отримують кулясті частинки;
- вплив температури середовища па швидкість осадження слід враховувати лише при малих значеннях критерію Рейнольдса $Re < 1,74$.

Але автор не враховував стисненість частинок. Рух частинок при розділенні відбувається в умовах їх масового осадження в обмеженому об'ємі, при цьому на частинки впливають стінки апарату, а також інші частинки в потоці. Р. Річардсом [67] експериментально встановлено, що кінцеві швидкості стисненого осадження частинок завжди менше швидкостей їх вільного осадження. Р. Річардс запропонував розрахунок кінцевої швидкості руху стисненого осадження частинок.

Критики теорії Рітгінгера - Річардса [20, 68-72] відзначають, що згідно з нею, абсолютна швидкість руху частинок, що випадають з потоку, дорівнює рівності між швидкістю їх рівномірного падіння і швидкістю висхідного потоку. Як висновок, можна сказати що в послідовно з'єднаних апаратах з різними швидкостями потоку одержувані продукти матимуть чіткі межі крупності. Однак на практиці продукти розділення містять частинки всіх розмірів, з яких складаються початково, хоча й в різній кількості. Висновок даної теорії про те, що концентрація частинок в потоці знижує швидкість осадження окремих зерен, але не впливає на результати розділення, також не знайшов свого підтвердження. Практика ж показує, що підвищення концентрації твердої фази в середовищі призводить до зниження ефективності розділення. Залежності для розрахунку, отримані з аналізу закономірностей руху одиночної частинки, дають лише якісну оцінку явищам переносу частинок, що не дозволяє використовувати їх для створення методики розрахунку технологічних і конструктивних параметрів процесів розділення.

М.Д. Барський в роботі [4] зазначає, що подальший розвиток теорії гравітаційного збагачення йде в напрямку уточнення окремих положень, але в принципових питаннях основоположні ідеї, сформовані в працях Рітгінгера і

Річардса, не змінилися до теперішнього часу. Приймаючи до уваги наукові роботи авторів [69,73-77], М.Д. Барський зводить сучасні теоретичні уявлення гравітаційного процесу розділення до наступних положень:

1. В апаратах з висхідним потоком середовища напрямок руху частинки визначається співвідношенням між її кінцевою швидкістю осадження і швидкістю потоку. При цьому частинка виноситься з апарату, якщо кінцева швидкість осадження менше швидкості потоку, а якщо кінцева швидкість осадження більша від швидкості потоку, то частинка випадає з апарату проти руху потоку.

2. Швидкість витання частинок розрахована на поперечний переріз сепараційної зони, приймається рівною кінцевій швидкості осадження в нерухомому середовищі, при цьому структура потоку ігнорується.

3. Взаємодія частинок між собою і стінками апарату не завжди враховується, а основним фактором процесу вважається взаємодія частинок із потоком.

4. При аналітичному описанні процесу розглядається поведінка окремої ізольованої частинки, але виявлені закономірності її руху переносяться на сукупність всіх частинок які розділяються.

5. Основні параметри потоку приймаються детермінованими, тому швидкість усталеного руху частинки в висхідному середовищі визначається різницею між швидкістю потоку і кінцевою швидкістю осадження.

6. Вважається, що концентрація матеріалу в потоці рівномірно розподілена в об'ємі сепараційної камери.

7. Найбільшу ефективність процес розділення має при досягненні частинками сталих швидкостей руху.

8. Основні закономірності руху частинок що розділяються в рідині, переносяться і на їх поведінку в газі. Тобто не завжди враховуються відмінності щільності і в'язкості несучих середовищ.

9. У теорії не враховується вплив складу вихідного матеріалу і його концентрації в потоці на чіткість розділення, що створює труднощі при проектуванні класифікуючих пристроїв.

М.Д. Барський розглядає теорію розшаровування суміші матеріалу за усталеними швидкостям руху або по крупності, як основу механізму гравітаційної класифікації, елементи якої викладені в роботах [68,71,74,77,78]. Відповідно до цієї теорії частинки в залежності від їх крупності повинні розташовуватися в стовпі потоку на певних рівнях. Але, як показують експериментальні дослідження у вертикальній трубі з відсічками [4,20], на різних рівнях знаходяться частинки різних розмірів. Звідси можна зробити висновок, що при гравітаційної класифікації в висхідному потоці відбувається розшаровування за швидкостями усталеного руху, а не зміна крупності зерен по висоті апарату.

З метою спрощення складного механізму руху двофазного потоку при його вивченні і математичному описанні, даний рух розглядається як однофазне псевдогомогенне середовище з підвищеною щільністю і в'язкістю [28,79-80]. Такий підхід коректний при виведенні диференціальних рівнянь, які описують кінетичні закономірності наскрізних транспортних потоків, однак для процесу класифікації даний підхід не є коректним.

У роботах [81-87] розглянуті виведення диференціальних рівнянь руху двофазних потоків на основі законів механіки. Найбільш коректною, відносно механізму перенесення твердих частинок турбулентним потоком газу, вважається система диференціальних рівнянь Ф.І. Франкля [87]. Але ці рівняння мають ряд припущень, більшість з яких суперечать реальним умовам. Знайти вирішення даних рівнянь методом інтегрування неможливо, тому що невідомі граничні умови та не задані поля швидкостей, тисків та інших параметрів двофазного потоку [88-89].

Зважування і перенесення твердих частинок турбулентним газовим середовищем описують також диференціальними рівняннями руху дисперсних потоків [90-92]. Рішення в загальному вигляді подібних рівнянь пов'язано з

труднощами, так як невдало вибираються вихідні рівняння і часто ігноруються деякі види руху зважених частинок [93,94].

Існує також аналогія між процесами розділення дисперсних систем і суцільних середовищ [95]. Ця аналогія являється окремим випадком аналогії між псевдозрідженим шаром і крапельною рідиною [28,96-97]. В основі цієї аналогії лежить термодинамічна спільність енергетичних станів між дисперсними і краплиннорідкими системами [89,98]. Якщо мірою теплового руху молекул крапельної рідини є температура, то мірою інтенсивності переміщення твердих частинок в псевдозрідженому шарі є швидкість газу. Сутність переходу нерухомих шарів у зважений стан і назад можна розглядати з точки зору фазових перетворень «тверде тіло - рідина - пар». Кожній з цих фаз відповідає певний стан системи. Так, нерухомий шар вважають аналогом твердого тіла, псевдозріджений шар - аналог киплячої рідини, розбавлена фаза - аналог пароподібного стану.

Автори робіт [99-100] трактують отримані закономірності при вивченні винесення та класифікації частинок в апаратах з псевдозрідженим шаром з позиції аналогії між досліджуваним процесом і процесами дистиляції та ректифікації.

В роботах [89,100-103] автори досліджуючи процес повітряної класифікації, спираються при отриманні основних закономірностей на зазначену вище аналогію. При цьому вважають, що в апарат входить вихідна суміш, аналог рідини, а зважені частинки - аналог пару. Матеріал, що виноситься потоком газу з апарату, містить велику кількість дрібних частинок, тобто він збагачений тонкодисперсною фракцією - аналог низькокиплячого компонента рідкої суміші. Матеріал, що випадає з потоку в нижню частину апарату (провал) збагачений крупнодисперсною фракцією - аналог висококиплячого компонента. Виходячи із співставлення двох процесів – класифікації і ректифікації, багато науковців мають сумнів в можливості отримання вузьких фракцій шляхом одного розділення в пустотілому апараті.

Це подібно до того, що шляхом однократної перегонки рідкої суміші неможливо отримати чисті компоненти.

В роботі [28] вказані межі застосування аналогії між краплинною рідиною і псевдозрідженим шаром. Зазначена аналогія зберігається тільки при однорідному псевдозрідженні. Псевдозріджені системи є стислими, тоді-як крапельна рідина практично нестислива. Псевдозріджені системи володіють анізотропією, що не властиво ньютонівським крапельним рідинам [104]. Незважаючи на зазначені відмінності та неповноту аналогії між псевдозрідженими системами і крапельними рідинами, вона дозволяє встановити певні залежності між параметрами розведеної і щільної фази [89].

Підводячи підсумок, можна сказати, що гравітаційні методи збагачення досі не мають єдиної загальноновизнаної теорії. Навіть при наявності різних теорій про сутність руху двофазних потоків, механізм зважування і перенесення твердих частинок до сих пір не пояснений.

1.3. Теоретичні закономірності руху двофазних потоків в сепараційному каналі пневмокласифікаторів

В даний час відомо достатньо математичних моделей, які описують рух сукупності частинок і враховують взаємозв'язок параметрів суцільної і дисперсної фаз. Вирішення запропонованих диференціальних рівнянь викликає певні труднощі для практичних розрахунків через недостатню вивченість реальних умов протікання процесу розділення частинок в висхідному потоці газу.

Автори [105] вказують на наявність двох наукових напрямків в теоретичних дослідженнях гідродинаміки двофазних потоків: детермінованого і ймовірно-статистичного. Детермінована модель розглядає закономірності руху в потоці окремих частинок у вільних або обмежених умовах. Основою

ймовірно-статистичної моделі є вивчення закономірності випадкових та стохастичних процесів руху сукупності частинок і середовища, який характеризується певними незмінними параметрами. Такий рух розглядається як результат дії внутрішніх і зовнішніх сил, яке носить ймовірно-статистичний характер. Тому для пояснення основних закономірностей досліджуваного явища застосовуються положення теорії ймовірності.

Розглянуті підходи вивчення складних процесів руху двофазних систем мають певні недоліки. Так, детермінований метод не повністю розкриває закономірності масового руху частинок, що спостерігається на практиці, проте дозволяє кількісно оцінити вплив сил, що викликають переміщення частинок. Ймовірно-статистичний підхід не дає можливості дати кількісну оцінку, але розкриває основні закономірності руху сукупності частинок в потоці.

При вивченні процесів переносу в чистій рідині використовуються два різних підходи: феноменологічний і статистичний (молекулярно-кінетичний) [88,101]. Феноменологічний підхід базується на використанні рівнянь Ейлера, Нав'є-Стокса або Рейнольдса для турбулентних течій. В основі статистичного підходу лежить кінетична теорія Больцмана-Чепмена-Енського [106] чи більш загальна теорія переносу [107].

Автори робіт [15,21,79,108] виділяють три основних наукових підходи для математичного опису гідродинаміки двофазних систем: динамічний, феноменологічний та статистичний.

Динамічний метод (детермінований) заснований на законах механіки і пропонує математичний опис процесу у вигляді диференціальних рівнянь руху окремої ізольованої частинки. За отриманими закономірностям оцінюється поведінка сукупності рухомих частинок в потоці газу.

Диференційне рівняння руху частинки с початковими умовами:

$$m = \frac{d\vec{v}}{d\tau} = \sum \vec{F} - c_f s \frac{\rho_r (\vec{v} - \vec{w})}{2} (\vec{v} - \vec{w}), \quad (1.1)$$

де \vec{v} - вектор швидкості частинки;

$\sum \vec{F}$ - вектор рівнодіючої сили, що діє на частинку;

ρ_r - щільність газу, кг/м³;

c_f - коефіцієнт аеродинамічного опору частинки;

s - площа поперечного перетину частинки, м²;

$(\vec{v} - \vec{w}) = \vec{u}$ - відносна швидкість обтікання частинки газовим потоком.

Відомі численні диференціальні і інтегральні рівняння руху двофазного потоку, які розкривають цей метод [25,88,109-110].

В основі феноменологічного підходу використовується схема суцільного середовища, тобто двофазний потік розглядається як суцільне, безперервно розподілене по простору середовище (континуум), яке характеризується фізичними властивостями реальної рідини [110-114].

Рух газу у загальному вигляді можна описати за допомогою системи диференційних рівнянь Нав'є-Стокса:

$$\begin{cases} \frac{\partial W_x}{\partial \tau} + W_{x,y,z} \operatorname{div} W = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x} + \nu \nabla^2 W_x \\ \frac{\partial W_y}{\partial \tau} + W_{x,y,z} \operatorname{div} W = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial y} + \nu \nabla^2 W_y \\ \frac{\partial W_z}{\partial \tau} + W_{x,y,z} \operatorname{div} W = g - \frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial z} + \nu \nabla^2 W_z \end{cases} \quad (1.2)$$

Розміри частинок і відстань між ними приймаються незрівнянно малими в порівнянні з розмірами простору, який їх обмежує. Для реалізації даного підходу використовуються загальні фізичні закони в поєднанні з експериментальними даними та вводяться співвідношення між основними параметрами досліджуваної системи, отримані евристичним шляхом. Недоліками феноменологічного підходу являється відсутність можливості

фізичного обґрунтування коректності співвідношення між величинами, що спостерігаються і неможливістю визначення коефіцієнтів, що входять в диференціальні рівняння, які характеризують взаємодію фаз. Тому такі співвідношення визначаються тільки дослідним шляхом, що істотно ускладнює задачу.

Зазначені недоліки можуть бути усунені в рамках більш глибокого статистичного підходу, який вивчає закономірності масового руху частинок, що запропонований Д. Максвеллом і Л. Больцманом. Цей метод виявляє зв'язок макроскопічних властивостей досліджуваної системи з основними параметрами мікрочастинок, які її складають, використовуючи функції їх розподілу. Статистичний підхід дозволяє визначити закономірності руху частинок в просторі і в часі, використовуючи на відміну від динамічного, не всю інформацію про поведінку окремої частинки. Автори, які підтримують даний підхід [115-133], виходять з того, що в турбулентному потоці на рух частинок разом з детермінованими величинами впливають і випадкові фактори. До них відносяться: зіткнення частинок між собою і із стінками апарату [123-126], нерівномірність полів швидкостей [75,78,126], локальні нерівномірності у вигляді турбулентних вихорів і циркуляційні потоки [28,96,127] та інші. В результаті перенесення окремо взятої частинки являє собою випадковий процес, а зважування і перенесення сукупності частинок - одночасна реалізація багатьох таких процесів. Базовим рівнянням стохастичних моделей являється диференціальне рівняння збереження маси кожної окремої фракції вихідного продукту шириною $[\delta, \delta + d\delta]$, яке в стаціонарному випадку має вигляд [15]:

$$\frac{d}{dx} \left(pv - D \frac{dp}{dx} \right) = q_e(x, \delta) \quad (1.3)$$

де p – лінійна концентрація частинок фракції;

v - швидкість квазістентного руху фракції;

D - коефіцієнт макродифузії частинок;

$q_e(x, \delta)$ - щільність підводу частинок фракції від зовнішнього джерела.

Класифікацію математичних моделей течії неоднорідних гетерогенних систем запропонували В.П. М'ясников і В.В. Струминський [128-129]. Відповідно до запропонованої класифікації всі моделі діляться на чотири групи: феноменологічні, феноменологічні з елементами статистики, статистичні з елементами механіки суцільного середовища і «чисто» статистичні. В окремих роботах В.П. М'ясникова [128,132-133] разом зі статистичним описом руху дискретного компонента в псевдозрідженому шарі застосовується модель механіки суцільного середовища для зважуючого газу. Статистичні моделі використовуються в роботах [128,134] і ґрунтуються на введенні функцій розподілу, як для твердих частинок, так і для молекул газу з подальшим отриманням кінетичних рівнянь.

Із зазначеними вище підходами, для опису основних закономірностей руху двофазного потоку застосовується і системно-інформаційний підхід, який заснований на інформаційному принципі максимальної ентропії [135]. З фізичної точки зору вводиться в опис процесу поняття дискретності середовища і стохастичності явищ мікрорівня. Такий підхід дозволяє знайти рішення систем рівнянь, за допомогою вибору найбільш ймовірних станів, оперуючи інформаційної ентропією як мірою невизначеності. При цьому інформаційна ентропія оцінює різноманітність елементів в системі за певною ознакою, яка потрібна при вирішенні того чи іншого завдання. Системно-інформаційний підхід застосовується і для розрахунку основних параметрів процесу класифікації, зокрема для кількісної характеристики гранулометричного складу вихідної суміші та ефективності її розділення [136-137]. Процес пневмокласифікації спрямований на впорядкування гранулометричного складу вихідної полідисперсної суміші частинок, тому в фракціях, які одержують, різнорідність частинок за розмірами зменшується.

Аналізуючи зазначені вище підходи до математичного опису руху двофазного потоку, можна зробити висновки, що динамічний метод, який

досить широко застосовується в класичній гідравліці, дозволяє отримати коректні результати тільки при вільному русі крупних частинок, коли їх концентрація в потоці незначна і граничні умови практично не впливають на процес. Також численні диференціальні рівняння, отримані даним методом, не дозволяють розрахувати концентрацію розподілених в потоці частинок, а також визначити структуру газосуспензії.

Науковці [112,138-139] вважають, що рівняння, які базуються на феноменологічному підході, можуть бути записані лише для рідкої фази, а для твердої фази повинні мати дискретний вигляд. Це пояснюється некоректним підходом при розгляданні двофазного потоку «газ - тверде» як єдине ціле, тому що рух обох фаз викликаний різними силами. Твердий матеріал складається з інертних включень в несучому середовищі, і тому рівняння для зваженої твердої фази передбачають заміну дискретного руху сукупності частинок, які взаємодіють між собою фіктивним континуумом з властивостями потоку. Даний підхід передбачає осереднення динамічних характеристик по сукупності частинок. Проблеми гідродинаміки такого середовища обумовлені недостатнім розумінням механізму міжфазної взаємодії в гетерогенних потоках.

Складені на основі статистичного підходу диференціальні рівняння, найбільш об'єктивно враховують імовірнісний характер руху сукупності частинок в турбулентному потоці. Важливим підтвердженням статистичного характеру руху газодисперсного потоку є те, що він характеризується з одного боку, постійною мінливістю поведінки зважених частинок і елементарних обсягів несучого середовища, а з іншого - наявністю в стаціонарних умовах стійких значень основних характеристик потоку [89]. Статистичні методи дозволяють оцінювати вплив всіх параметрів процесу. Л.А. Барський і В.З. Козин [140] вважають, що при проведенні будь-якого процесу розділення, навіть при чіткій відмінності певних властивостей частинок, домогтися ідеального вилучення кожної частинки в окремий продукт неможливо. Таким процесам властива стохастичність. Таким чином, всі технологічні показники процесів розділення є інтегральними або з усередненими характеристиками, і

детермінований опис цих процесів з використанням лише фізичних властивостей і якостей окремих частинок неможливий. Тому процеси розділення можуть описуватися переважно стохастичними математичними моделями.

Ефективність розділення полідисперсних матеріалів на фракції за їх аеродинамічними властивостями залежить від цілого ряду технологічних і конструктивних параметрів процесу, але, в першу чергу обумовлюється структурою двофазного потоку. Аналітичний опис зважування та розподілу частинок в турбулентному газовому потоці зустрічає великі труднощі, що змушує спрощувати завдання.

Автори роботи [15] наводять сукупність рівнянь, що описують процес аеродинамічної класифікації як рух невзаємодіючих одна з одною частинок. Практичне використання такої математичної моделі занадто трудомістке. Тому цей метод зводиться до експериментальних досліджень на натурному зразку класифікатора.

Диференціальні рівняння, що описують перенесення полідисперсного матеріалу в газовому потоці як рух газодисперсного середовища вивчалися С.Г. Телетовим [81], Г.І. Баренблаттом [82], Ф.І. Франклем [87,90], Н.А. Слезкіним [33], Ю.А. Буевичем [23], Х. А. Рахматулиним [141] та іншими.

Ф.І. Франкль [87] на основі інтегральних рівнянь записаних окремо для кожного компонента, запропонував систему диференціальних рівнянь руху двофазного потоку. Система складається з десяти диференціальних рівнянь і відповідає уявленням про перенесення частинок турбулентним потоком.

У роботах [88,89,111] проаналізовано розвиток математичних моделей гідромеханіки гетерогенних систем. В роботі [88] підкреслюється, що системи рівнянь, отримані різними авторами, не охоплюють клас дисперсних потоків у всьому діапазоні зміни концентрації твердої фази. Ці рівняння не враховують зміни структури потоку. Загальним їх недоліком являється відсутність даних про розподіл концентрацій частинок. Автор [89] вважає, що подібні диференціальні рівняння представляють теоретичний і практичний інтерес, так

як допомагають встановити завдання дослідження і визначити спосіб обробки і узагальнення дослідних даних. У зв'язку з цим автори [81,88,89,111] роблять висновок, що отримані диференціальні рівняння руху двофазних потоків знайдуть своє застосування в теорії подібності.

Аналіз критеріїв подібності і складених з них критеріальних рівнянь для опису руху у газі як одиночної частинки, так і їх сукупності приведений в роботах [2,88,89].

Авторами [72] для опису руху двофазного потоку пропонується система з одинадцятьма критеріями подібності: шести визначених і п'яти невизначених.

Однак Є.В. Донат [89] вважає, що критерії подібності однофазних систем без будь-яких підстав використовуються і для опису властивостей двофазного потоку. За допомогою широко відомих на практиці критеріальних залежностей, вирішуються переважно вузькі конкретні завдання [88]. Отримані критеріальні рівняння не дозволяють розрахувати оптимальні технологічні і конструктивні параметри апаратів, які застосовуються для розділення сипучих полідисперсних сумішей в турбулентному потоці газу.

Для пояснення закономірностей двофазних турбулентних потоків все частіше підходять зі статистичних позицій. Через велику кількість зважених частинок, і частинок що переміщуються, двофазна система набуває нових своєрідних статистичних закономірностей, які не визначаються за допомогою законів класичної механіки.

В роботах [115-122,142] при дослідженні двофазних потоків застосовували статистичні методи. Е.А. Непомнящий [115,143] розглядає кінетику сепарування частинок без урахування їх інерції на основі марковських процесів. Особливість будь-якого марковського процесу, що описує зміну визначеної величини в часі, полягає в тому, що за відомим в даний момент часу значенням величини можна визначити ймовірності її значень в усі наступні тимчасові інтервали.

Стохастичний аналіз гідромеханічних процесів розділення гетерогенних систем розглянуто А.М. Кутеповим [121]. Характеризуючи перспективи

стохастичного опису зазначених процесів, автор підкреслює, що розширення рамок застосування стохастичної теорії пов'язано з розширенням меж її інформаційного базису. Суть останнього полягає в накопиченні експериментальних і теоретичних даних про поля швидкостей несучого потоку і випадкових впливах. Застосування багатьох розроблених стохастичних моделей де описується процес гідромеханічного розділення гетерогенних систем в конкретних конструкціях апаратів не розвивається, через відсутність інформації про адекватні крайові умови, необхідні для інтегрування рівняння Колмогорова - Фоккера - Планка.

О.Н. Тихонов [144] вважає, що рівняння типу Колмогорова - Фоккера - Планка не пояснюють істотних сторін сепараційного масопереносу, так як вони не враховують можливість зміни фізичних ознак частинок і інших важливих для процесу факторів.

В роботі [145] проведено стохастичний аналіз руху частинок диспергуючої фази щодо детермінованих траєкторій в потоці з флуктуаційними пульсаціями. Отримана математична модель описує рух частинки в висхідному повітряному потоці, яка справедлива для сталого слабозапиленого осесиметричного турбулентного потоку.

Авторами [146] було отримано рівняння для аналітичного розрахунку сепараційної кривої. Дане рівняння справедливе для пустотілих конструкцій апарату, тому застосовувати його для розрахунку процесу пневмокласифікації в апараті з різними контактними елементами, які ускладнюють структуру потоку, не коректно.

На основі стохастичного методу, з використанням ланцюгів Маркова в роботі [103] дається математичний опис процесу розділення дисперсних матеріалів в системі класифікаторів, з'єднаних за схемою "ректифікації". Однак при виведенні залежності фракційного коефіцієнта вилучення від числа ступенів класифікації, автори зробили допущення, що не відповідають реальним умовам проведення процесу: 1) частинки при русі не впливають одна на одну; 2) для кожного ступеня класифікації сума вхідних потоків матеріалу

дорівнює сумі вихідних потоків; 3) числа розділення для всіх ступенів класифікації однакові.

Науковцями також розглянуті теоретичні основи стохастичного моделювання процесу аеродинамічної класифікації [147-148]. Базовою залежністю подібних стохастичних моделей служить диференціальне рівняння збереження маси кожної вузької фракції вихідного продукту.

Розглянувши вищенаведені методики і математичні моделі, можна зробити наступний висновок, що процеси розділення сипких матеріалів на фракції можуть бути представлені стохастичними математичними моделями. Розвиток цих моделей при використанні сучасних методів призведе до розробки єдиної теорії процесів розділення, яка дозволить створювати високоефективне обладнання для повітряної класифікації полідисперсних матеріалів. Однак стохастичний підхід не дозволяє повністю розкрити фізичний механізм протікання процесу класифікації, виявити та пояснити окремі характерні особливості цього механізму. Крім цього, виникають певні труднощі при визначенні чисельних коефіцієнтів і величин, що характеризують імовірнісний характер досліджуваного явища і входять в кореляції, отримані статистичними методами. Вийти з ситуації можливо лише шляхом накопичення та узагальнення експериментальних даних із застосуванням сучасних методів спостереження і фіксування швидкоплинних процесів.

1.4 Сили, що діють на частинку в газовому потоці

Процес розділення сумішей сипких матеріалів проходить в основному в сепараційній зоні. Поведінка частинки, що знаходиться в рухомому середовищі всередині сепараційної зони, визначається силами які на неї впливають [2]:

1) сили, що впливають на поверхню частинки з боку потоку (сила опору, підйомна сила, сила, обумовлена інерцією приєднаної маси, дифузійна сила);

2. сили поля (масові, зовнішні сили), що діють на частинку (сила тяжіння, сила електростатичного поля, сила магнітного поля, сили, обумовлені обертанням рухомої (неінерціальної) системи координат, - відцентрова і коріолісова сили);

3. сила інерції (при прискореному русі частинок);

4. сили, що діють між поверхнями окремих твердих частинок (сили від взаємних зіткнень, сили тертя, сили зчеплення).

Аналіз даних сил з точки зору їх ролі в процесі повітряної сепарації показує, що вплив інерції приєднаної маси дуже малий, якщо, мова йде про сепарацію твердих частинок в газовому потоці. Дифузійна сила непридатна для отримання траєкторій частинок в потоці, які помітно відрізняються, тобто для сепарації; при отриманні дуже дрібної фракції, ця сила може негативно впливати на процес. Сили електростатичного та магнітного полів поки не достатньо використовуються при сепарації сипких сумішей. Електростатичне поле дуже широко застосовується для пиловловлювання, однак застосування його для повітряної сепарації дає нечіткий і нерегульований поділ. Сили зчеплення ведуть до агломерації, яка негативно впливає на процес розділення. Сили від взаємних зіткнень сприяють руйнуванню агломератів, але з іншого боку порушують траєкторії руху окремих частинок, чим впливають на ефективність процесу розділення. Сили тертя між рухомими в потоці частинками і стінками, що обмежують зону сепарації, гальмують потік і таким чином негативно впливають на ефективність розділення.

Таким чином, основними силами в процесі повітряної сепарації є сила опору і масові сили (сила тяжіння і сила інерції частинок). Масові сили – для відділення крупних частинок і сила опору для відділення і видалення дрібної фракції. Дані сили можуть діяти в одному напрямку, тоді матиме місце пневмотранспорт, а сепарація буде відсутня. Ефект сепарації виникає тільки тоді, коли масова сила і сила опору діють в різному напрямку, тобто між їх векторами є певний кут θ . При $\theta = 180^\circ$ виникає протитечійна рівноважна

сепарація, при $\theta = 90^\circ$ - поперечно-потокова, при $90^\circ < \theta < 180^\circ$ - сепарація в «косому» потоці [2].

Частинки, у яких внаслідок їх розміру або щільності масова сила більше опору, продовжують рухатися за первинними траєкторіях і потрапляють в крупний продукт, а частинки з меншим розміром або щільністю слідуєть за газовим потоком і виносятьсь в дрібний продукт. При протитечійній сепарації частинки, у яких масова сила і сила опору рівні, знаходятьсь в стані «витання». Вони потрапляють в крупну або дрібну фракцію лише за умови дії інших сил.

У реальному класифікаторі внаслідок наявності побічних потоків, нерівномірності полів швидкостей і впливу тих чи інших неврахованих факторів межа поділу розмивається, деяка частка частинок, що мають розмір більше граничного, потрапляє в дрібний продукт, і навпаки.

Висновки до першого розділу. Постановка задач досліджень.

1. Після аналізу існуючих конструкцій пневматичних класифікаторів приходимо висновку, що перспективи розвитку мають гравітаційні каскадні класифікатори. Нова форма корпусу, зниження гідравлічного опору в корпусі, відмова від контактних пристроїв в апараті, все це впливає на вирішення основної задачі – покращення якості розділення.

2. Після аналізу літературних джерел, можна зауважити, що зараз всі перспективи розвитку пневмокласифікаторів вбачаютьсь в розвитку та дослідженні внутрішніх контактних елементів, що дозволить оптимізувати гідродинамічні параметри процесу, та його ефективність.

3. Після аналізу різноманітних математичних моделей і методів розрахунку процесу пневмокласифікації, приходимо висновку, що раціонально використовувати для розрахунку і описання даного процесу детерміновану

модель, в якій вихідні параметри системи однозначно визначаються вхідними параметрами системи.

4. Основними задачами, які орієнтовані на створення високоефективного пневмокласифікатора та на виявлення закономірностей проведення класифікації різних матеріалів, являються:

- проведення досліджень на розробленому «ромбічному» апараті, який не містить в своєму корпусі контактних елементів, з метою виявлення гідродинамічних особливостей процесу та їх впливу на ефективність розділення;

- визначення основних технологічних параметрів, таких як: швидкість потоку, витрата газового потоку, час завантаження матеріалу, час розвантаження шару матеріалу, загальний час процесу, визначення забрудненості дрібними частинками провалу, втрати крупних частинок а також загальної ефективності розділення;

- експериментальне дослідження структури потоку в апараті та характеру розділення частинок в різних зонах корпусу;

- розробка математичної моделі гідродинаміки однофазного газового потоку;

- розробка математичної моделі гідродинаміки двофазного потоку;

- розробка математичної моделі пневмокласифікації;

- розробка методики інженерного розрахунку технологічних і конструктивних параметрів «ромбічного» пневмокласифікатора;

- промислова апробація розробленого пневмокласифікатора.

Основні результати опубліковано в наступних працях [149, 150].

РОЗДІЛ 2

ХАРАКТЕРИСТИКА ОБ'ЄКТІВ ДОСЛІДЖЕННЯ ТА МЕТОДИКИ ПРОВЕДЕННЯ ЕКСПЕРИМЕНТІВ

2.1 Характеристика пісочної суміші

В якості модельного матеріалу була обрана бінарна суміш кварцового піску. Пісок — осадова уламкова гірська порода і штучний матеріал, що складається із зерен гірських порід. Часто зерна піску представлені майже винятково кварцом. За розміром зерен піски класифікують на тонкозернисті (0,05—0,1 мм), дрібнозернисті (0,1—0,25 мм), середньозернисті (0,25—0,5 мм), крупнозернисті (0,5—1,00 мм), грубозернисті (1—2(3) мм).

Таблиця 2.1 – Класифікація пісків у залежності від густини

Клас піску	Група піску за густиною	Середня густина зерен, г/см ³	Насипна густина, кг/м ³
Щільні	Дуже важкі	понад 2,8	понад 1800
	Важкі	від 2,0 до 2,8 включно	від 1300 до 1800 включно
	Середні	від 1,2 до 2,0 включно	від 800 до 1300 включно
Пористі	Легкі	від 0,6 до 1,2 включно	від 400 до 800 включно
	Дуже легкі	менше 0,6	менше 400

За речовинним складом розрізняють піски мономінеральні, що складаються із зерен головним чином одного мінералу, олігоміктні, складені зернами 2—3 мінералів з переважанням одного, і поліміктні, що складаються із

зерен мінералів і гірських порід різного складу. Найчастіше зустрічаються піски кварцові, аркозові (кварц-полевошпатовий), глауконіт-кварцовий, слюдисті і інші. Домішки — слюда, карбонати, гіпс, магнетит, ільменіт, циркон тощо. Зерна піску за формою округлі, округло-кутасті і кутасті, за ступенем обкатуваності — обкатані, напівобкатані і гострокутні.

Таблиця 2.2 – Механічні властивості піску

Розрахунковий опір R в кг/см ² піщаних основ			
№	Назва ґрунту	Ґрунти основи	
		щільні	середньої щільності
1	Піски гравелисті і крупнозернисті незалежно від вологості	4,5	3,5
2	Піски середньої зернистості незалежно від вологості	3,5	2,5
3	Піски дрібні		
	а) низьковологі	3,0	2,0
	б) дуже вологі і насичені водою	2,5	1,5
4	Піски пилюваті		
	а) низьковологі	2,5	2,0
	б) дуже вологі	2,0	1,5

Тобто, як витікає із приведених фізичних властивостей кварцового піску, він як модельний досліджуваний матеріал, найбільш підходить до вимог, тому що має достатню міцність та поділяється на вузькі по розмірам окремі фракції.

2.2 Експериментальна установка для пневматичної класифікації

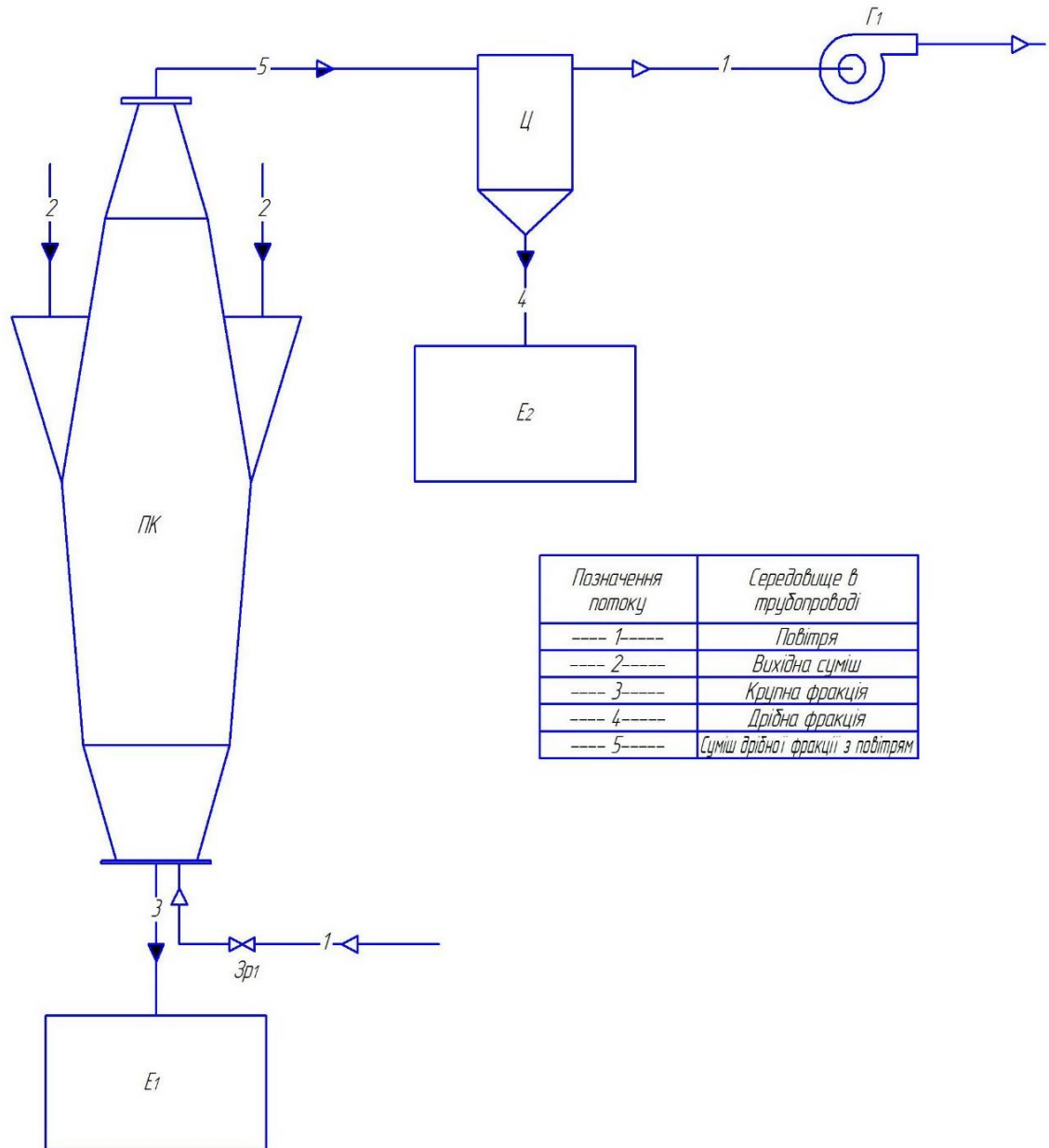
Експериментальні дослідження процесу розділення сипких матеріалів на фракції, проводилися в створеній експериментальній лабораторній установці (рисунок 2.1).

В основі створення експериментальної лабораторної установки, було поставлене завдання створення пристрою для пневмокласифікації сипких матеріалів шляхом зміни форми робочого об'єму апарату, за рахунок чого підвищується якість розділення, зменшується гідравлічний опір, а отже збільшується питома продуктивність та ефективність процесу пневмокласифікації.



Рисунок 2.1 — Експериментальна установка для пневмокласифікації

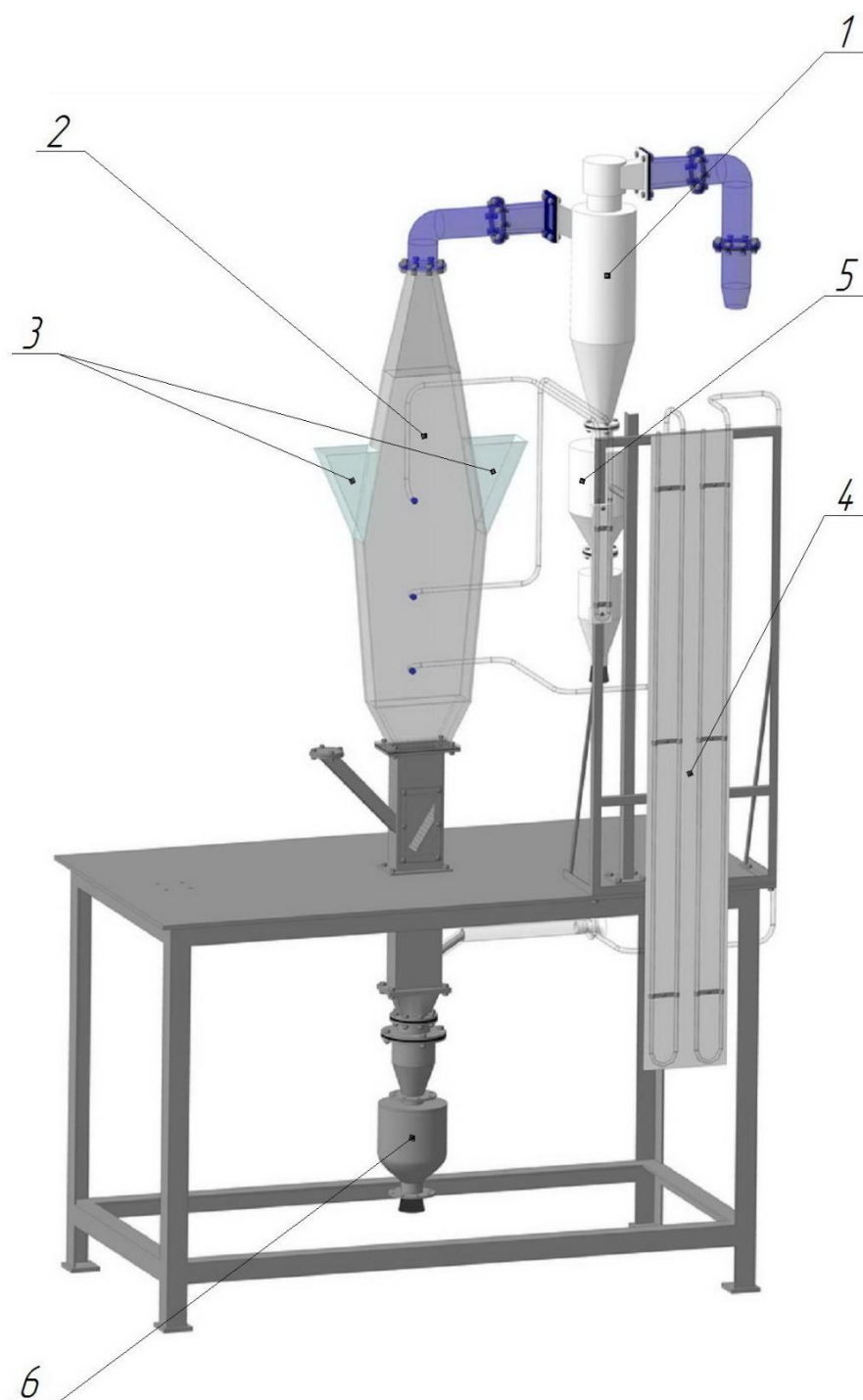
На рисунку 2.2 представлена технологічна схема експериментальної установки для пневмокласифікації.



Ц — циклон; ПК — пневмокласифікатор; Γ_1 — газодувка для створення всмоктувального потоку; E_2 — бункер збору дрібної фракції; E_1 — бункер збору крупної фракції; Zp_1 — тарований колектор з регулюючою засувкою.

Рисунок 2.2 — Технологічна схема експериментальної установки для пневмокласифікації

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



1 — циклон; 2 — пневмокласифікатор; 3 — бункери для введення сировини; 4 — манометри; 5 — бункер збору дрібної фракції; 6 — бункер збору крупної фракції.

Рисунок 2.3 — Схема експериментальної установки для пневмокласифікації

тарованим колектором з регулюючою засувкою Zr_1 . Фракція (дрібнодисперсна частина) виноситься потоком повітря і потрапляє в циклон, де осаджуються дрібні частинки в бункер E_2 , а повітряний потік виноситься в атмосферу. Крупнодисперсна частина просипається в нижню частину апарату і через розподільний пристрій виводиться в бункер E_1 . Всмоктувальний повітряний потік створюється за допомогою газодувки Γ_1 .

До складу установки (рисунок 2.3) входить пневмокласифікатор 2, який виконаний з органічного скла, що покращує умови візуалізації досліджуваного процесу. Розділення відбувається безпосередньо в корпусі пневмокласифікатора, який має 2 робочі зони, нижня частина – зона сепарації, в якій проходить обертання і пересівання матеріалу, а також винесення з шару, що обертається, дрібної і крупної фракції, а верхня частина – це зона, в якій дрібна фракція розганяється і виноситься з апарату. Дрібна фракція, що виноситься з апарату, проходить циклон 1, і осаджується в бункер збору дрібної фракції 5, а крупна фракція просипається донизу і потрапляє в бункер збору крупної фракції 6. Завантаження сировини відбувається за допомогою бункерів для введення сировини 3.

2.3 Методики дослідження гідродинамічних закономірностей, пневматичної класифікації та кінетики руху частинок в апараті.

Схема експериментальної установки, на якій проводились дослідження, зображена на рисунку 2.3.

Методика дослідження гідравлічних закономірностей процесу класифікації. Річний пісок висушувався у муфельній печі та за допомогою набору сит +0,63 мм; +0,4мм; +0,315 мм; +0,2 мм; +0,16 мм отримувалась нависка піску. Далі нависка зважувалась на електронних вагах Momert-6000 з точністю 0,1 г та завантажувалась у бункер для введення сировини 3. Далі

вмикалась газодувка, і за допомогою зажиму, що перетискає повітряний потік, регулювалась витрата повітря. Тиск в корпусі апарату фіксувався за допомогою U-подібних рідинних манометрів 6. Вимірювання швидкості повітря в апараті проводились за допомогою вводу в корпус апарату трубки Піто-Прандтля, в різних його перетинах (рисунок 2.4). Трубки під'єднувались до мікроманометра с похилою трубкою ММН-240(5)-0,1, яким вимірювався надлишковий тиск в перетинах корпусу апарату, а величина тиску, за допомогою тарувальних графіків переводилась у швидкість.



Рисунок 2.4 — Схема замірів тиску в апараті за допомогою трубки Піто-Прандтля.



Рисунок 2.5 — Мікроманометр з похилою трубкою ММН-240(5)-0,1

2.4 Методика дослідження часу завантаження фракції в апарат та підпитки шару матеріалу. Кінетика руху частинок в апараті.

В лабораторних умовах повітряний потік потрапляє в апарат через вхідний колектор, і далі по патрубку безпосередньо у секції входу повітряного потоку. Витрата повітря регулюється зміною перетину вхідного патрубка, що відображається на манометрі.

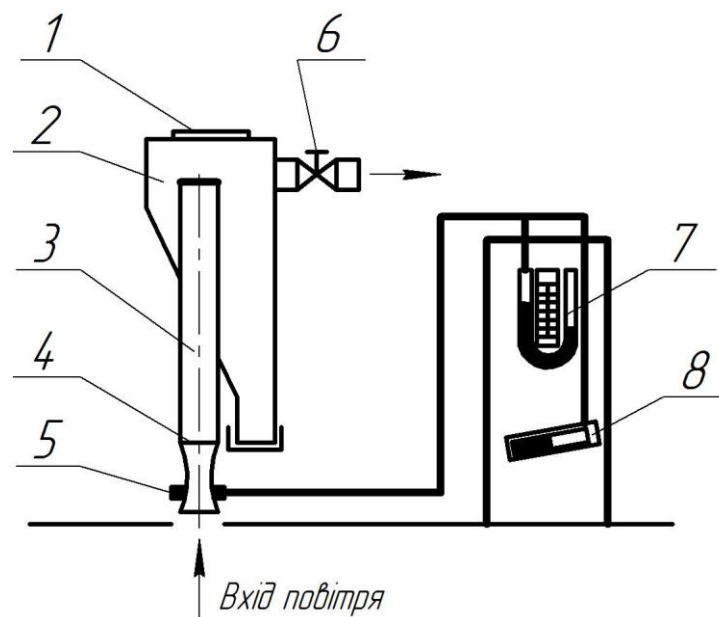
Завантаження частинок в апарат проходить дозовано. Для запуску процесу спочатку подається потрібна доза матеріалу для створення обертового шару в корпусі. А далі через кожні 60 секунд відкривається вхід із завантажувального бункеру в апарат, і протягом 15 секунд в апарат вводиться наступна доза матеріалу в обсязі 50 – 60 грамів, що складає величину питомого навантаження в межах 18 – 65 кг/м²·с. Шар матеріалу, який обертається в корпусі знову насичується і процес стабілізується.

2.5 Методика дослідження ефективності класифікації.

Після повного розвантажування суміші піску із завантажувального бункеру в корпус апарату, останній працює протягом 20 хвилин, поки сформований шар матеріалу не зруйнується, і матеріал не осяде в бункерах для збору дрібної та крупної фракції. Далі розвантажується дрібна фракція, і просівається за допомогою набору сит +0,63 мм; +0,4мм; +0,315 мм; +0,2 мм; +0,16 мм. Навіска з кожного сита зважується на електронних вагах Momet-6000, і вираховується процент крупної фракції, який міг бути винесений із апарату разом із дрібною фракцією. Так само проводиться ситовий аналіз і з крупною фракцією, і вираховується процент дрібної фракції, яка могла бути втягнута вниз крупною фракцією, і потрапила у бункер збору крупної фракції.

2.6 Методика дослідження швидкості витання полідисперсних систем для аналізу можливостей роботи апарату з різними матеріалами.

Дослідження проводились на експериментальній установці (рисунок 2.6), яка складається із скляної трубки 3, сепаратора 2 і пристрою для створення всмоктувального потоку. В нижній частині трубки встановлена сітка з дрібними комірками 4, на яку і завантажують досліджувані частинки.. Витрата повітря регулюється вентилем 6, який забезпечує плавне регулювання. Для вимірювання витрати повітря на всмоктуючому патрубку труби 3 передбачений тарований колектор 5, до якого під'єднаний U-подібний дифманометр 7, або мікроманометр з похилою шкалою 8 для вимірювання невеликих витрат повітря.



- 1 — люк; 2 — сепаратор; 3 — скляна трубка; 4 — сітка; 5 — тарований колектор; 6 — регуляційний вентиль; 7 — U-подібний дифманометр; 8 — мікроманометр з похилою шкалою.

Рисунок 2.6 – Схема експериментальної установки для дослідження швидкості витання

Для кращої візуалізації досліджуваного процесу витання частинок апарат виконаний із органічного скла.

Модель апарату для дослідження швидкості витання і створений стенд представлений на рисунку 2.7.



Рисунок 2.7 – Експериментальна установка для дослідження швидкості витання.

Методика проведення дослідження:

На нижню сітку 4 через люк 1 в верхній частині сепаратору 2 завантажуються частинки що досліджуються. Всмоктуючий потік повітря створюється за допомогою газодувки. Проходячи через скляну трубку 3 потік повітря створює необхідний гідравлічний тиск на досліджувані частинки, які знаходяться в скляній трубці 3 на сітці 4. За допомогою U-подібного дифманометра 7, або мікроманометра з похилою шкалою 8 фіксується необхідна швидкість газового потоку, при якій виносяться із зваженого шару матеріалу частинки певного розміру у сепаратор 2. Далі регулюючим вентиляем 6 збільшується витрата газового потоку і фіксується певна швидкість газового

поток, при якій частинки в більшій кількості у сепаратор 2. Ці заміри повторюються декілька разів і закінчуються при досягненні повного виносу частинок матеріалу у сепаратор 2. В даній методиці швидкість витання частинок відповідає виносу частинок в кількості 50% від загальної маси шару матеріалу на сітці 4.

Витрата повітря V_{II} знаходилась по показникам дифманометра ΔP :

$$V_{II} = \alpha \cdot S_0 \sqrt{\frac{2\Delta P}{\rho}}, \quad (2.1)$$

де α – коефіцієнт витрати колектора (при відношенні меншого діаметра колектора до більшого $d_0 / D_0 = 0,05 - 0,6$, приймаємо $\alpha = 0,5 - 0,8$);

S_0 – площа перетину меншого діаметру колектору, м²;

ρ – густина матеріалу, кг/м³.

Швидкість повітря (відповідно швидкість витання частинки) визначалась з рівняння витрати:

$$W_{II} = \frac{V_{II}}{0.785} D_{TP}^2, \quad (2.2)$$

де D_{TP} – внутрішній діаметр труби

2.7 Оцінка похибок вимірювання

Для вимірювання геометричних розмірів частинок піску використовується набір сит +0,63 мм; +0,4мм; +0,315 мм; +0,2 мм. Вага навіски

піску вимірювалась за допомогою: до 200 г – аналітичні та електронні ваги М-200 (точність 0,0001 г та 0,01 г відповідно); до 500 г – електронні ваги Momert-6000 (точність 0,1 г). Для вимірювання часу застосовували електронний секундомір КК-5853, з точністю вимірювання 0,01 с.

Перепад тиску вимірювали за допомогою U-подібного манометра, температуру повітря у приміщенні і вологість повітря за допомогою - Метеостанції EA2 BL502 SLIM.

Середньоквадратичне відхилення розрахункових значень від експериментально отриманих визначали за формулою [106]:

$$S = \sqrt{\frac{\sum(X^2 - \bar{X}^2)}{n-1}}, \quad (2.3)$$

де X – розраховане значення;

\bar{X} – усереднене експериментальне значення;

n – кількість вимірювань.

Абсолютне значення відносної похибки між розрахунковими та експериментальними значеннями визначали за формулою [107]:

$$\Delta = \left| \frac{X_E - X_T}{X_E} \right|, \quad (2.4)$$

де X_E – експериментальні значення;

X_T – теоретичні (розрахункові) значення.

Граничні значення похибок прямих вимірювань використовуваних приладів приведені в таблиці 2.3.

Таблиця 2.3 – Граничні значення похибок прямих вимірювань

Параметр	Позначення	Одиниці вимірюв.	Прилад	Похибка	
				абсолютна	відносна
Розмір частинок	D	$мм$	Набір сит	$1 \cdot 10^{-1}$	$1 \cdot 10^{-2}$
Вага	G	$Кг$	Аналітична	$1 \cdot 10^{-7}$	$5 \cdot 10^{-10}$
			Електронна М-200	$1 \cdot 10^{-5}$	$5 \cdot 10^{-9}$
			Електронна Momet-6000	$1 \cdot 10^{-4}$	$5 \cdot 10^{-7}$
Мікро-манометр	ΔP	$мм.вод.ст.$ $т.$	U-подібний манометр	1	$4 \cdot 10^{-3}$
Температура повітря	t	$^{\circ}C$	Метеостанція EA2 BL502 SLIM	0,5	$5 \cdot 10^{-3}$
Відносна вологість повітря	φ	$\%$	Метеостанція EA2 BL502 SLIM	$1 \cdot 10^{-1}$	$1 \cdot 10^{-2}$
Час досліду	τ	$с$	Електронний секундомір КК-5853	$1 \cdot 10^{-2}$	$5 \cdot 10^{-6}$

Висновки до другого розділу

1. Обґрунтовано вибір об'єктів дослідження та надано їх основні характеристики.

2. Спроектовано та розроблено експериментальну установку для проведення досліджень.

3. Наведено методики дослідження гідродинамічних закономірностей процесу класифікації.

4. Розроблено та обґрунтовано методику дослідження часу завантаження фракції в апарат та підпитки шару матеріалу.

5. Наведено методику кінетики руху частинок в апараті та методику дослідження якості класифікації.

6. Розроблено та обґрунтовано методику дослідження швидкості витання полідисперсних систем для аналізу можливостей роботи апарату з різними матеріалами.

Основні результати опубліковано в наступних працях [153, 156, 157].

РОЗДІЛ 3

ФІЗИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ТА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ГІДРОДИНАМІКИ ДВОФАЗНОГО ПОТОКУ ТА ЕФЕКТИВНОСТІ ПРОЦЕСУ ПНЕВМОКЛАСИФІКАЦІЇ НА МОДЕЛІ РОМБІЧНОГО ПНЕВМОКЛАСИФІКАТОРА

3.1 Фізична модель гідродинаміки двофазного потоку

В основу досліджень поставлене завдання створення способу пневмокласифікації сипких матеріалів шляхом раціонального використання робочого простору, та застосування більш ефективних засобів і прийомів впливу на потік сипкого матеріалу, що сприяє додатковому пересіванню матеріалу, і таким чином забезпечує значне підвищення якості розділення, а також створення пристрою для пневмокласифікації сипких матеріалів шляхом зміни форми робочого об'єму апарату, за рахунок чого підвищується якість розділення, зменшується гідравлічний опір, а отже збільшується питома продуктивність та ефективність процесу пневмокласифікації.

Для вирішення цих завдань запропоновано новий спосіб пневмокласифікації сипких матеріалів. Він включає в себе створення всмоктувального висхідного вертикального повітряного потоку, в який подається вихідний матеріал. Далі продукти розділення розподіляються на фракції і виводяться із апарату. Згідно [158] корпус виконаний ромбічної форми, з кутом розкриття $\alpha_1 = 8^\circ - 9^\circ$ і кутом закриття $\alpha_2 = 10^\circ - 11^\circ$, що не суперечить рекомендаціям [28], відносно яких, кут розкриття і закриття конусу не повинен перевищувати 20° . Завантажувальні бункери розташовані в середній частині корпусу симетрично відносно його вертикальної осі. Подача вихідного матеріалу і повітряного потоку здійснюється у корпус апарату, причому вихідний матеріал подається періодично в середню частину корпусу шляхом його двостороннього вводу. Розподіл на фракції відбувається у нижній частині апарату, при чому крупна фракція, яка просипалась вниз апарату, виводиться, а

дрібна фракція, що виноситься потоком у верхню частину апарату, розганяється під кутом закриття ромбу і виводиться із апарату. Розроблений апарат для пневмокласифікації сипких матеріалів у всмоктувальному висхідному вертикальному повітряному потоці містить корпус, завантажувальний бункер, розвантажувальні пристосування для великої і дрібної фракції та джерело повітряного потоку.

Періодична двостороння подача матеріалу в середню частину ромбічного корпусу апарату дозволяє створити умови, за яких створюється шар матеріалу, що обертається та піджимається потоком від однієї стінки до іншої. Шар матеріалу створюється за рахунок скупчення частинок матеріалу, які одразу не розділились. Створення шару проходить штучно, за рахунок подачі в корпус апарату першої дози матеріалу щонайменше в потрібній кількості. Цей шар частково перекриває вхід повітряного потоку в пристрій, і за рахунок різкого збільшення швидкості отримує турбулентний рух, в процесі якого шар матеріалу піджимається то до однієї, то до іншої стінки конуса, чим створює різкі прискорення потоку. Це дає змогу отримати додаткове пересівання матеріалу в нижній частині пристрою та регулювати обертання матеріалу в сепараційній зоні пристрою, що впливає на ефективність розділення.

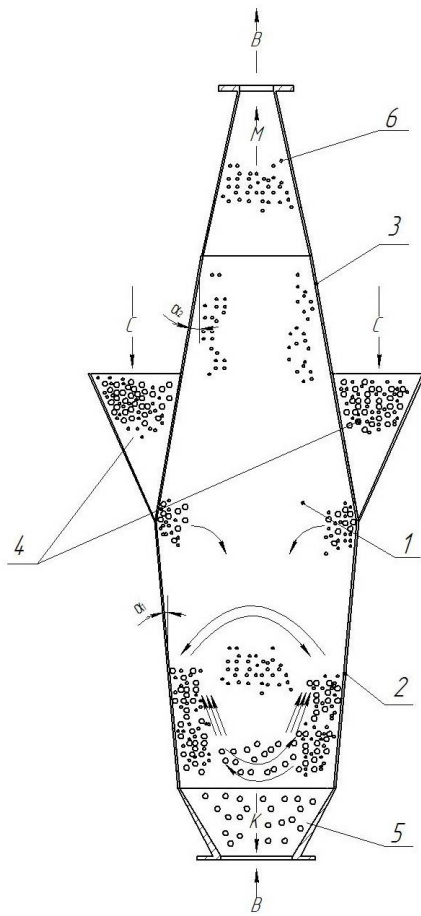
Виконання корпусу апарату для пневмокласифікації сипких матеріалів ромбічної форми (рисунок 3.1) дозволяє ефективно розділяти сипкі матеріали на фракції. Така форма дозволяє створити дві робочі частини, нижня частина – зона сепарації, в якій проходить обертання та пересівання матеріалу, а також витягання повітряним потоком з шару, що обертається, дрібної і крупної фракції, а верхня частина – це зона, в якій дрібна фракція розганяється і виноситься з апарата. Кут розкриття $\alpha_1 = 8^\circ - 9^\circ$ оптимальний для проведення процесу в апараті, що дозволяє вихідну суміш, яка подається в апарат, одразу ж підхвачувати повітряним потоком. Якщо кут α_1 менший 8° , то форма апарату буде прагнути до прямокутної форми, а це приведе до того, що режим руху буде протитечійний. Якщо кут α_1 більший 9° , то матеріал буде скуплюватись на стінці, не буде підхвачуватись повітряним потоком, що не надасть йому

турбулентного руху. Кут закриття $\alpha_2 = 10^\circ - 11^\circ$, оптимальний для того, щоб дрібна фракція розганялась і виносилась з апарату. Якщо кут α_2 менший 10° , не буде розганяння дрібної фракції, а якщо кут α_2 більший 11° , то разом з скупченням дрібної фракції з апарату буде виноситись крупна фракція. Оснащення пристрою додатковим бункером, розташованим в середній частині корпусу симетрично відносно його вертикальної осі і симетрично відносно основного бункеру, дозволяє реалізувати двосторонній ввід матеріалу в корпус апарату, що запобігає значній концентрації фракцій в шарі, що обертається в його нижній частині. Отже все це надає можливість зменшити гідравлічний опір, підвищити якість розділення, що забезпечує збільшення питомої продуктивності та ефективності процесу класифікації.

Процес розділення в запропонованому апараті реалізується в такій послідовності. Газодувкою (на рисунку. не показана) формується всмоктуючий повітряний потік. Вихідний матеріал подається періодично в середню частину апарату. Перша доза матеріалу подається в потрібній кількості, яку підхвачує повітряний потік, транспортує через апарат в нижню частину, в якій створюється шар матеріалу, який, піджимаючись струменем повітря від стінки до стінки, вибиває з себе дрібну фракцію у верхню частину апарата, а крупну фракцію в нижню частину апарата. Дрібна фракція, що підхвачується струменем повітря, розганяється під кутом закриття ромбу у верхній частині апарату і виноситься з апарату. Крупна фракція просипається в нижню частину апарата, і виходить з нього. Частина матеріалу, яка не розділилась, продовжує обертатись. Далі знову спрацьовує завантажувальний бункер і поступає в апарат наступна доза матеріалу, але в одиничній кількості, і цикл повторюється.

Апарат (рисунок 3.1) містить корпус 1 ромбічної форми, з кутами розкриття $\alpha_1 = 8^\circ - 9^\circ$ і закриття $\alpha_2 = 10^\circ - 11^\circ$, дві робочі частини – нижню частину 2, зону сепарації, яка призначена для обертання та пересівання матеріалу і вибивання з обертового шару дрібної і крупної фракції матеріалу і верхню частину 3, зона, яка призначена для розганяння і транспортування дрібної фракції матеріалу. Також апарат має завантажувальні бункери 4, розташовані в

середній частині корпусу 1 симетрично відносно його вертикальної осі, розвантажувальні патрубки 5 для крупної фракції і 6 для дрібної фракції.



- 1 — корпус пневмоклаسیфікатора;
 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.

Рисунок 3.1 — Схема роботи пристрою для пневмоклаسیфікації

Робота пристрою реалізується таким чином:

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. 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 кількість матеріалу в одиничній кількості, і

процес класифікації починається спочатку.

Для забезпечення процесу пневмокласифікації в пустотілому апараті змінного перерізу необхідний активний контакт поверхні частинок з повітряним потоком. В нашому випадку маємо завислий шар матеріалу у вигляді «подушки», тобто шар матеріалу, що обертається, який створений подачею в апарат потрібної першої дози матеріалу. Від швидкості обертання і маси «подушки», а також координат положення залежить ефективність розділення. В загальному вигляді «подушка» представлена на рисунку 3.2.

Виходячи із особливостей процесу видно, що іде динамічне зміщення центру «подушки» по певним траєкторіям, що видно з рисунку 3.3. «Подушка» допомагає направити частинку в потрібну зону апарату, зону сепарації 2, або в зону розгону і виведення дрібних частинок 3. В момент завантаження фракції в апарат, за рахунок інерційних сил менших для дрібних і більших для крупних частинок, дрібні частинки в більшій мірі видуваються потоком повітря одразу, а крупні частинки, попадають у «подушку» матеріалу, разом із частиною дрібних частинок, які випадково не видулись з апарату одразу (рисунок 3.4). Ті частинки, які потрапили в «подушку» приймають її швидкість обертання.



Рисунок 3.2 — Загальний вигляд «подушки», яка створюється в процесі роботи пневмокласифікатора



Рисунок 3.3 — Загальний вигляд зміщення центру «подушки» в процесі роботи

В момент обертання «подушки» крупні частинки випадають із потоку і виводяться із апарату через зону 2, а дрібні частинки набувши швидкості «подушки» і ще й розігнані повітряним потоком вириваються з неї, і попадаючи в верхню частину корпусу 3 розганяються і виводяться із апарату (рисунок 3.5).

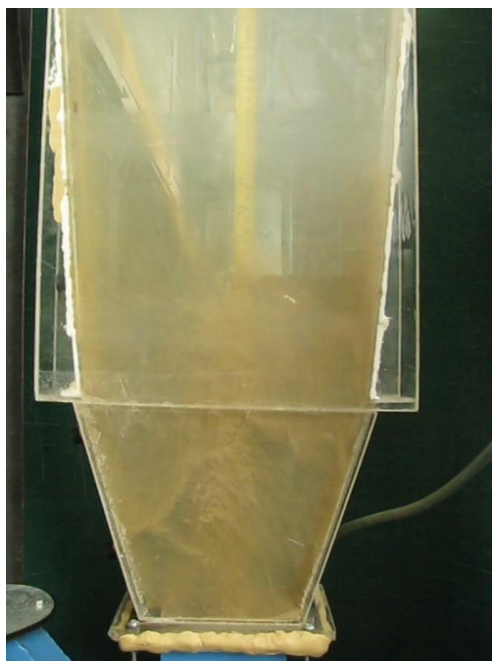


Рисунок 3.4 — Загальний вигляд дозавантаження «подушки» матеріалом



Рисунок 3.5 — Загальний вигляд розвантаженої «подушки» матеріалу



Рисунок 3.6 — Руйнування «подушки» матеріалу

«Подушка» створюється при першій подачі матеріалу у корпус пристрою. Кількість введення матеріалу потрібна бути в 3 рази більше від звичайної норми матеріалу, який подається для дозавантаження «подушки» і підтримання процесу розділення. В лабораторних умовах перша доза матеріалу завантажується 45 секунд, а для звичайної дози матеріалу потрібно 15 - 20 секунд. Період між дозавантаженнями «подушки» становить 60 секунд, тобто за 60 секунд «подушка» частково розвантажується, що представлено на рисунку 3.5. Якщо час до завантаження наступної дози матеріалу не витримати в межах 120 - 130 секунд, то це може привести до збою процесу розділення і руйнування «подушки» матеріалу, що представлено на рисунку 3.6.

Двофазний потік представляє собою складну систему, поведінка якої залежить від багатьох факторів. Одним із найголовніших факторів, який характеризує рух полідисперсних частинок в потоці, є ступінь турбулізації потоку. Турбулізація представляє собою тривимірний нестационарний рух, в якому створюється безперервний розподіл «пульсацій» швидкості. Середня швидкість руху є результатом усередненої, по великим проміжкам часу, дійсної швидкості. «Ппульсаційна» швидкість складається із різниці між дійсною і середньою швидкістю.

3.1.2 Фізична модель процесу пневмокласифікації

В основі механізму гравітаційної класифікації лежить гідродинамічна взаємодія між потоком і твердою фазою. Характер впливу частинок на потік залежить від величини об'ємної концентрації твердої фракції у повітряному потоці, розмірів і форми частинок.

Тобто об'ємна концентрація частинок:

$$\beta = \frac{V_q}{V_q + V_r}, \quad (3.1)$$

де V_q - сума об'ємів всіх твердих частинок в робочому просторі апарата, м³;

V_r - сума об'єму газової фази в робочому просторі апарата, м³.

Величина об'ємної концентрації твердої фази β в потоці впливає на характер його руху, так як корпус апарату складається із двох частин. В нижній частині — зоні сепарації, яка представляє собою дифузор, швидкість потоку падає після входу його в корпус апарату, і максимальне значення швидкості потоку (факел потоку) спостерігається по центру апарату, а наближаючись до стінок швидкість потоку знижується (рисунок 3.7). В верхній частині — зоні розгону, яка представляє собою конфузор, швидкість потоку зростає після проходження середини корпусу апарату (рисунок 3.8), факел потоку знаходиться по центру апарату, але тут вже швидкість потоку при наближенні до стінок починає збільшуватись, і на виході з корпусу факел потоку має таку ж швидкість, як і потік біля стінок (рисунок 3.9).

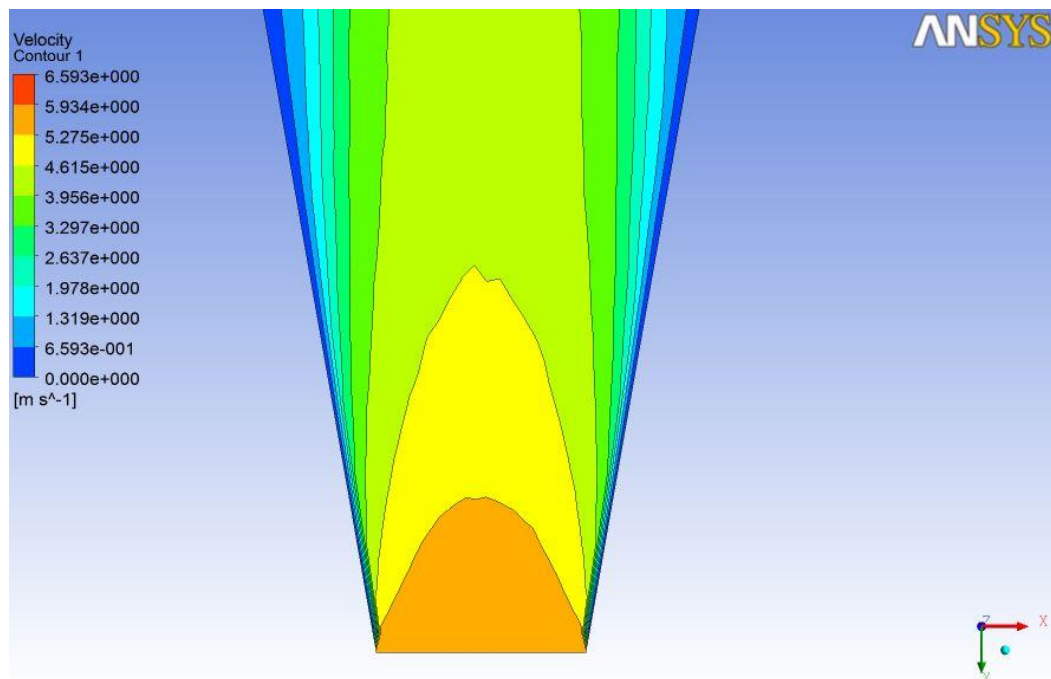


Рисунок 3.7 — Швидкість повітря на вході в апарат, в зоні сепарації (дифузор)

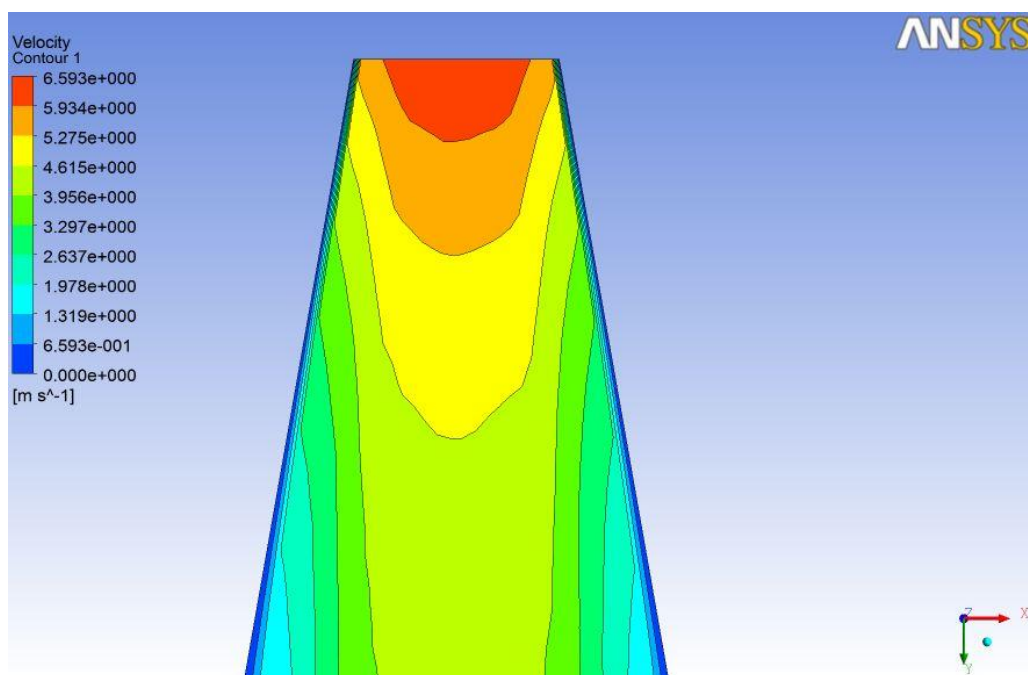


Рисунок 3.8 — Швидкість повітря на виході із апарату, в конфузорі

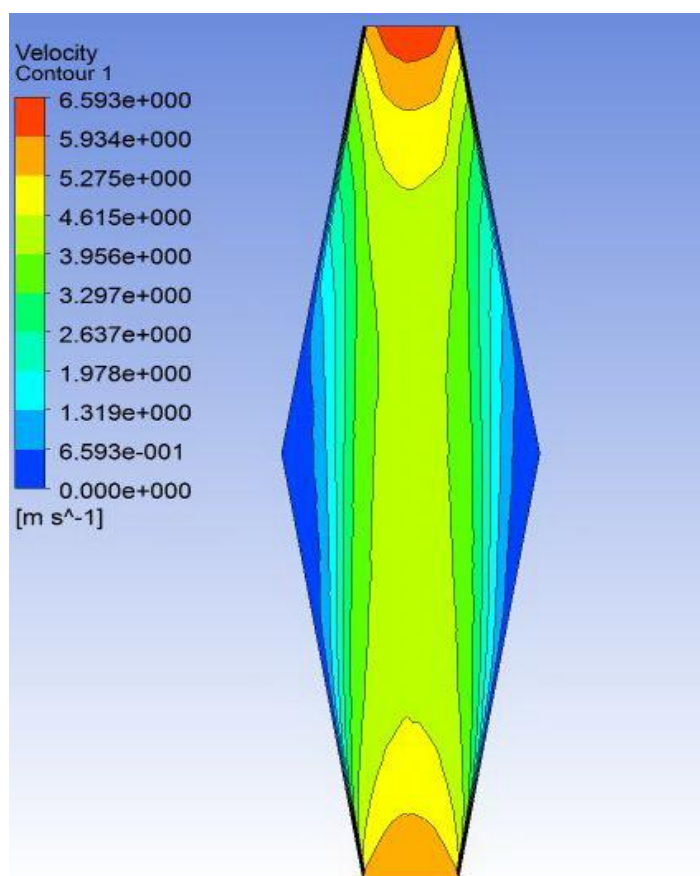


Рисунок 3.9 — Швидкість повітря в ненавантаженому апараті

При такому розподіленні швидкості повітряного потоку в корпусі апарату, концентрація частинок в нижній частині корпусу значно більша ніж в верхній частині, так як в нижній частині корпусу концентрується значна частина матеріалу у вигляді «подушки», і завантаження матеріалу відбувається із середини корпусу у нижню частину апарату (рисунок 3.2). В верхній частині апарату концентрація частинок незначна, в основному це дрібна фракція, яка і виноситься з корпусу потоком повітря, який після дифузора нижньої частини, починає розганятися у конфузори верхньої частини.

Значний вплив на гідродинамічну структуру потоку має також відмінність форми частинки від кулеподібної. При незначній швидкості така частинка може орієнтуватись вільним чином по відношенню до напрямку свого руху.

При проходженні частинкою середини апарату збільшується ймовірність її винесення. Зі збільшенням концентрації частинок в нижній частині апарату зменшується живий перетин потоку, що обумовлює локальне підвищення швидкості повітряного потоку та відповідно покращується контакт фаз. Локальні сплески швидкості позитивно впливають на винос дрібної фракції із шару матеріалу, вибиваючи їх із стабільно обертаючого шару матеріалу. Також впливає той фактор, що концентрації матеріалу в місці введення його в потік і на стабілізаційній ділянці потоку різні. При збільшенні концентрації частинок також збільшується число їх зіткнень в потоці, а вплив цього фактору на потік мало вивчений. «Подушка» в цьому випадку являється стабілізуючим фактором, яка дозволяє заспокоїти рух частинок і зменшити пульсації швидкості в робочому об'ємі апарату.

Характер руху частинки постійно змінюється. Частинка буде прагнути прийняти таке положення, при якому опір середовища буде максимальним. Цей ефект зростає при збільшенні Re_c [33]. Напрямок руху не кулеподібної частинки і вектор сили опору середовища не лежать на одній прямій, а створюють деякий кут. Траєкторія вільно падаючої частинки відхиляється від вертикалі, і це відхилення збільшується в залежності від крупності частинки. Внаслідок цього

ефекту і при наявності в поперечному перетині потоку градієнту осереднених швидкостей, що характерне для турбулентного режиму руху, частинка рухається по напрямленню до стінки апарату. Стисненість руху частинок проявляється під впливом сусідніх частинок, що залежить від концентрації матеріалу в потоці і наближенні стінок корпусу апарату, що залежить від розмірів корпусу [4, 20]. При збільшенні концентрації зростає взаємодія частинок між собою. Монодисперсні частинки рухаються в ламінарному потоці без поперечного зміщення, і вірогідність їх зіткнення незначна [25]. Якщо хоча б одна з перерахованих умов не виконується, то траєкторії різних частинок можуть перетинатися, що призводить до взаємодії частинок між собою (напр. створення агломератів). Число зіткнень достатньо велике, особливо при збільшенні швидкості потоку. При русі частинок в турбулентному потоці газу вони набувають радіальну швидкість і взаємодіють не тільки між собою, але і зі стінками апарату. На стінки приходяться періодичні ударні навантаження з боку частинок. Така взаємодія повторюється до моменту, поки частинка не покине межі апарату [4, 20]. Удари частинок об стінки призводять до великої різноманітності траєкторій руху.

У відмінності від монодисперсного складу, полідисперсний склад твердої фази достатньо сильно міняє гідродинамічні характеристики процесу руху частинок в зв'язку з виникненням нових явищ, які відсутні в монодисперсному матеріалі. Оскільки частинки різних розмірів рухаються з різними швидкостями, між ними відбуваються масові зіткнення (рисунок 3.10). Процес в таких умовах проходить при неусталених режимах руху частинок різних класів.

Виходячи із аналізу діючих факторів слідує, що поведінку частинок слід розглядати як ймовірність процесу взаємодії їх як з потоком так і з іншими частинками. Складність реального процесу пов'язана з одночасною дією різноманітних стохастичних факторів [88, 109].



Рисунок 3.10 — Рух полідисперсного матеріалу в апараті, зіткнення частинок між собою і стінками апарату.

Для виявлення основних механізмів визначаючих процес розділення, необхідно провести аналіз руху частинок в потоці газу.

3.2 Гідродинаміка однофазного потоку

Вимірювання швидкості газового потоку проводилось в ненавантаженому матеріалом апараті, за допомогою вводу в корпус апарату трубки Піто-Прандтля, в різних його перетинах (рисунок 2.4). Вимірювання проводились з використанням нижньої полички в секторі вводу повітряного потоку та без використання полички в секторі вводу повітряного потоку. Оцінювався характер руху газового потоку, а також оцінювався вплив полички на викривлення газового потоку в робочому об'ємі апарату.

Залежності зміни швидкості (рисунок 3.11) показують на негативний вплив полички у секторі введення газового потоку. Газовий потік двічі змінює свою траєкторію, спочатку на вході (рисунок 3.11 а), піджимаючись у лівий бік, а потім різко у правий бік (рисунок 3.11 б). В нижній частині корпусу створюється нестабільна зона, яка руйнує сформований шар матеріалу що обертається.

Піджимання газового потоку під одну із стінок апарату, негативно впливає на двостороннє дозавантаження матеріалом шару матеріалу що обертається. Дозавантаження проходить нерівномірно, але головне те, що в момент дозавантаження газовий потік рухаючись вздовж стінки (рисунок 3.11 в, г, д) одразу підхвачує матеріал і не дає йому потрапити в зону сепарацію, де обертається основний шар матеріалу. А це 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. Тому було прийняте рішення відмовитись від використання поличного елемента, і використовувати прямий вхід газового потоку.

Залежність (рисунок 3.12) показує, що створюється виражений факел потоку в центрі корпусу апарату, швидкість якого зменшується з висотою та ближче до стінок корпусу із-за ефекту дифузору, в вигляді якого зроблена нижня частина корпусу. Коли газовий потік проходить середину корпусу апарату і потрапляє в зону закриття конуса (ефект конфузору), швидкість газового потоку поступово зростає з висотою корпусу. Швидкість газового потоку впливає на ефективність розділення сипкого матеріалу. Низькі значення швидкості газового потоку впливають на дрібну фракцію, яка значно забруднює крупну фракцію, за рахунок того, що крупні частинки забивають дрібну фракцію і виносять разом з собою у збірник крупної фракції. Також дрібним частинкам не достатньо швидкості потоку для подолання центральної частини корпусу апарату та потрапляння у розгінну зону, із якої дрібні частинки винесуться в збірник дрібної фракції. При високих значеннях швидкості газового потоку відбувається розривання потоку і крупні частинки

потрапляють в зону винесення дрібної фракції, що призводить до втрат крупної фракції. Також висока швидкість впливає на утворення шару матеріалу, що обертається.

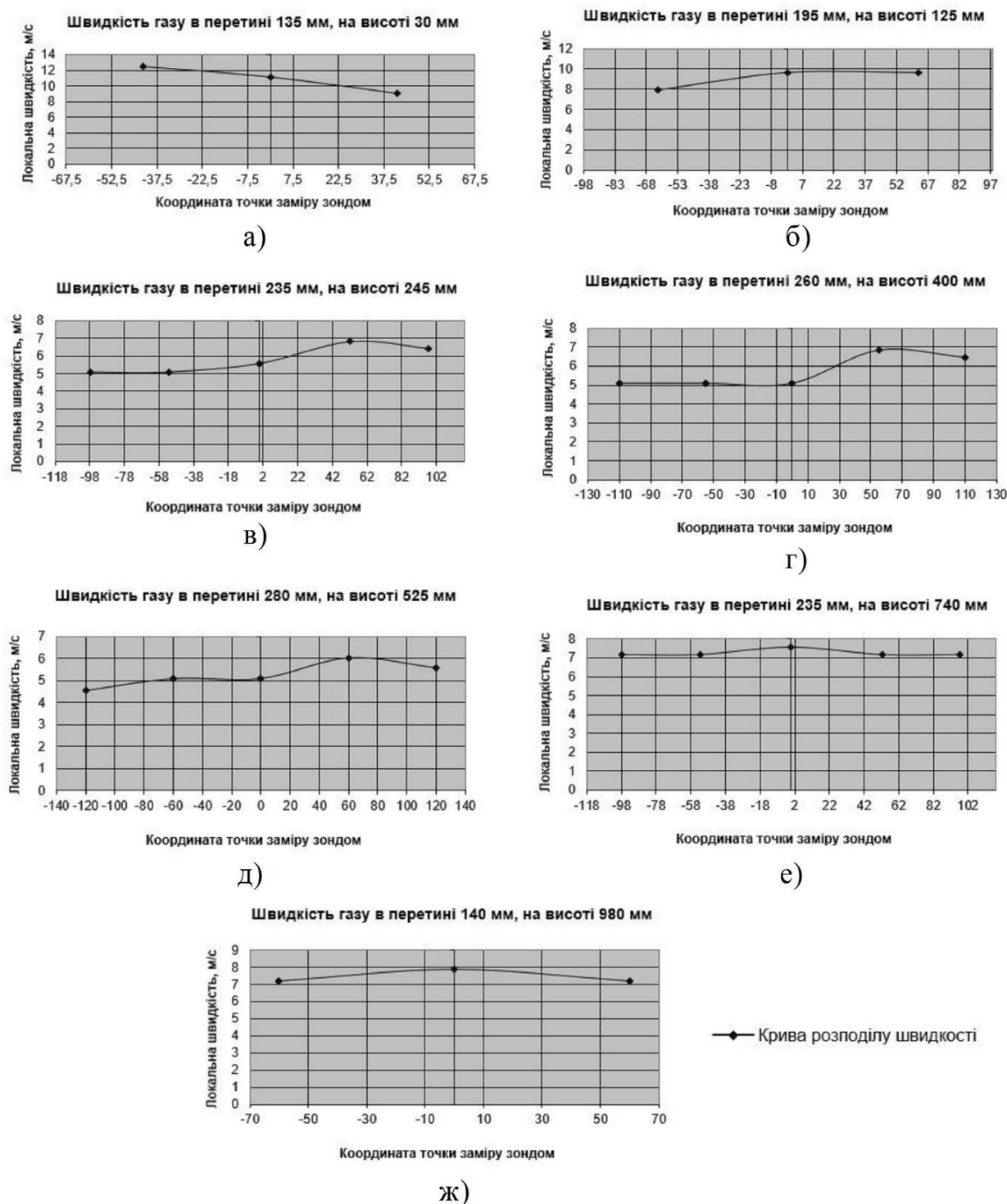


Рисунок 3.11 – Залежність швидкості повітряного потоку в перетинах апарату по висоті корпусу апарату з поличкою в секторі вводу повітряного потоку

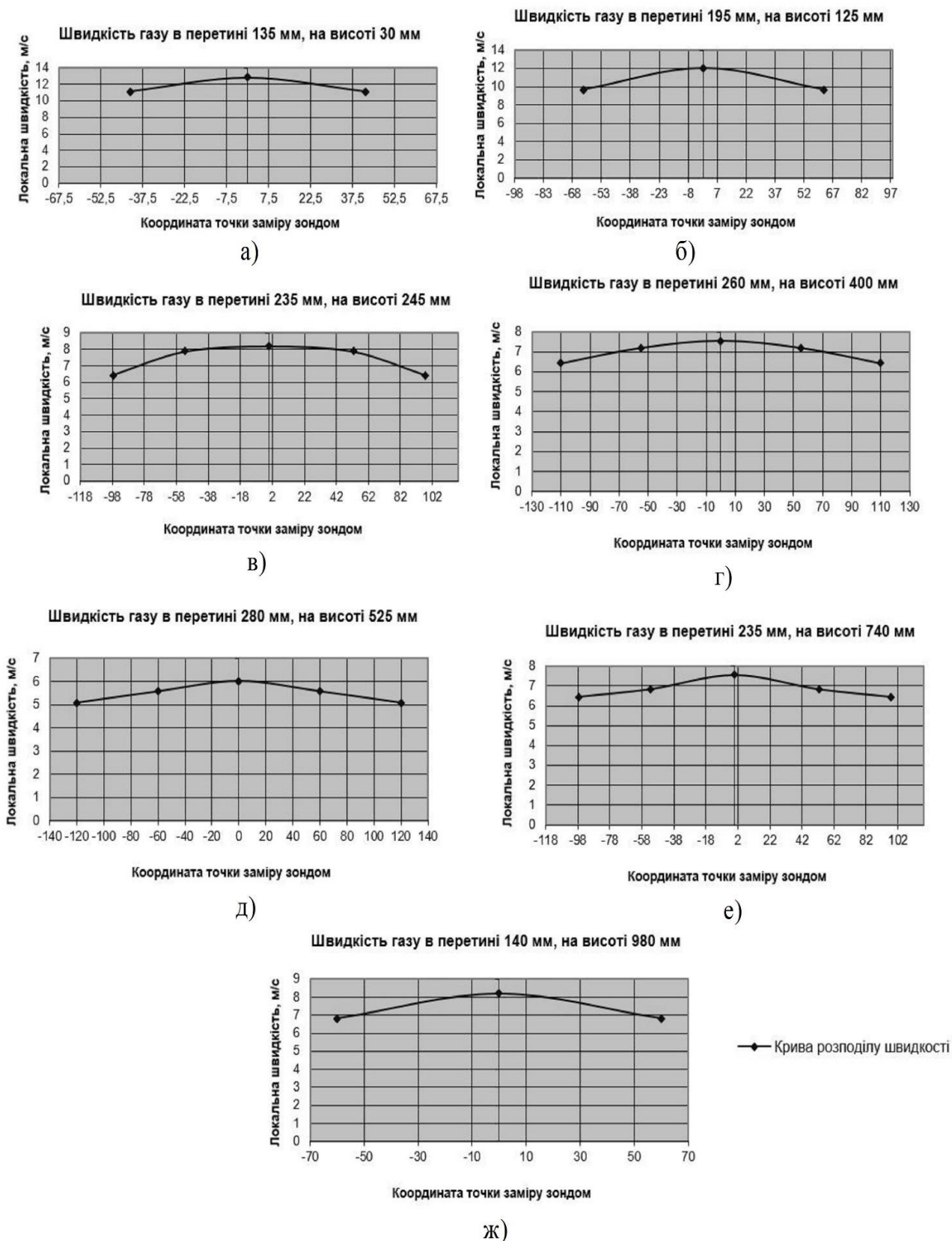


Рисунок 3.12 – Залежність швидкості повітряного потоку в перетинах апарату по висоті корпусу апарату без полицки в секторі вводу повітряного потоку

Шар матеріалу піднімається в центральну частину корпусу, в якій втрачає можливість обертатись, що призводить до його руйнування. Тому швидкість підбирається в залежності від властивостей матеріалу і крупності частинок, які потрібно розділити. Крупні частинки не повинні набрати достатню швидкість для того щоб подолати центральну частину апарату і винестись із апарату разом з дрібною фракцією. Факел швидкості повинен мати стабільну постійну швидкість, що позитивно впливає на обертання шару матеріалу. Шар матеріалу накопичуючи в собі частинки, опускається вниз до зони вводу газового потоку і підтискається то під одну то під іншу стінку апарату, за рахунок часткового перекривання газового потоку шаром матеріалу. За рахунок цього, газовий потік, піджимається то під одну стінку, то під іншу, що і змушує шар матеріалу до обертання.

3.3 Дослідження швидкості витання полідисперсних матеріалів

Ефективність класифікації залежить від двох швидкостей, які створюють рівновагу процесу. Перша – це швидкість газового потоку, а друга – це швидкість витання сипкого матеріалу. Без визначення швидкості витання матеріалу, не можливо підібрати відповідну швидкість повітряного потоку. Кожен сипкий матеріал, в залежності від параметрів форми частинок, густини частинок ті розміру частинок, має різну швидкість витання, яка визначається експериментально.

Для проведення експерименту були підібрані матеріали, які різняться своїми характеристиками і розміром частинок. Створювались суміші основного матеріалу і різних домішок, для більш точного визначення швидкості витання. Дослідження проводились на карбаміді, гречці, насінні моркви, насінні редису, просі та кварцовому піску з фракцією – $0,63+0,4$ мм і фракцією – $0,2+0,16$ мм.

Використовуючи отримані після експерименту данні, будується залежність кількості винесення матеріалу від швидкості газового потоку. Швидкість газового потоку, яка еквівалентна швидкості витання частинок, відповідає 50% кількості винесених частинок. Це дає можливість проаналізувати різницю в значеннях швидкостей витання частинок, домішок і основного матеріалу, а також зробити висновки про можливість відділення матеріалу від різноманітних домішок.

За табличними даними (Додаток А) побудована епюра залежності винесення матеріалу від розрахункової швидкості газового потоку (рисунок 3.13), на якій показана доля винесеного потоком газу матеріалу із апарату в залежності від збільшення швидкості газового потоку.

Залежності (рисунок 3.13) показують різницю швидкостей витання домішок і досліджуємого матеріалу. Зі збільшенням швидкості газового потоку, доля винесення матеріалу збільшується, тобто вибираючи швидкість газового потоку, потрібно враховувати при якій швидкості той чи інший матеріал почне виноситись з апарату разом із домішками, або провалюватись в провал разом із домішками.

В різних випадках, в залежності від суміші матеріалу, один і той же матеріал можна або вивести із апарату як дрібну фракцію, при умові що домішки будуть мати більшу швидкість витання, або ж навпаки, вивести із апарату домішки, при умові що домішки будуть мати меншу швидкість витання. Тому на основі отриманих даних, можна зробити висновок про можливість розділення представлених матеріалів від різноманітних домішок.

Отримані дані показують, що мінімальна різниця між швидкостями витання частинок основного матеріалу та домішок спостерігається для насіння моркви, швидкість витання домішок становить 1,1 – 2,1 м/с, а самого насіння 3,7 м/с.

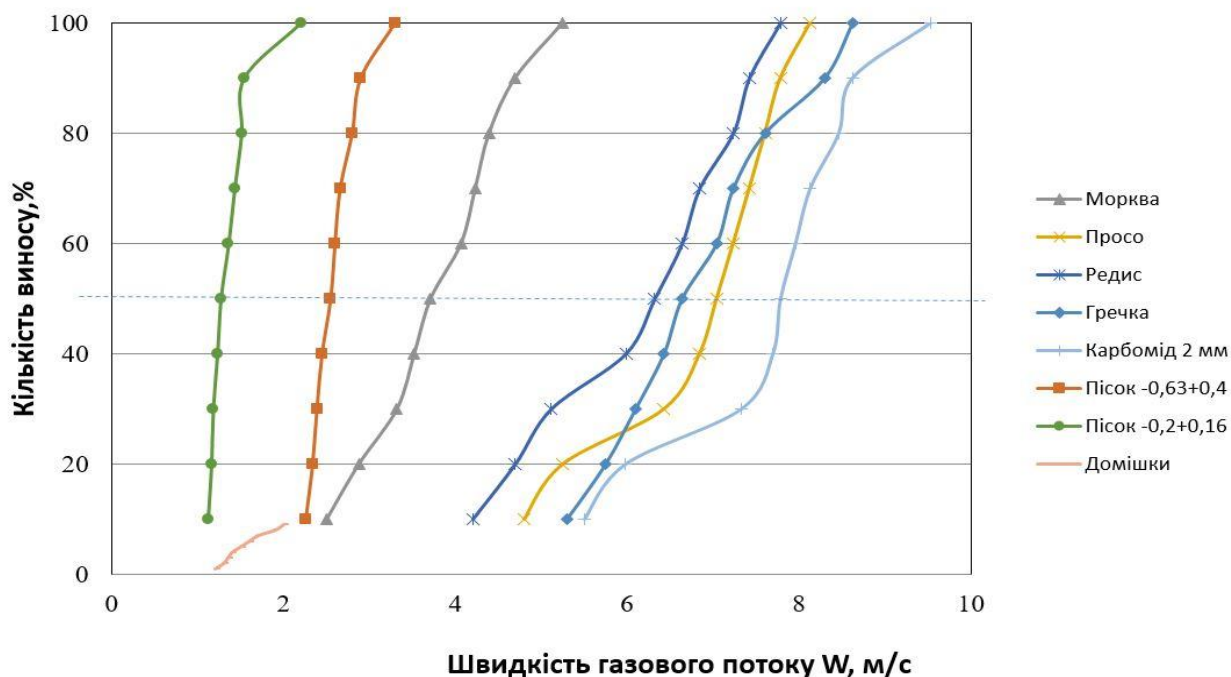


Рисунок 3.13 – Залежність кількості виносу частинок матеріалу і домішок від швидкості газового потоку

Мінімальна різниця між швидкістю витання дрібної і крупної фракції матеріалу спостерігається для кварцового піску, швидкість витання дрібної фракції становить 1,3 м/с, а швидкість витання крупної фракції 2,55 м/с. Для решти матеріалів швидкості витання їх частинок по відношенню до частинок домішок значно відрізняються. Домішки, які складаються переважно із дрібної фракції (відносно фракції матеріалу, що розділяємо), мають швидкість витання в межах 1,1 – 2,1 м/с, тому при розділенні вони попадуть у бункер збору дрібної фракції як відходи, а сам матеріал, швидкість витання частинок якого знаходиться у межах 3,5 - 9 м/с винесеться із апарату як крупна фракція. На основі отриманих даних можна проводити налаштування обладнання на різні типи матеріалу без додаткових експериментів і постійного підбору параметрів процесу.

3.4 Дослідження процесу класифікації

3.4.1 Дослідження впливу витрати газового потоку на якість розділення

Основним критерієм оцінки роботи обладнання для пневмокласифікації, являється ефективність розділення, яка включає в себе аналіз отриманих фракцій в виносі та провалі на місткість в своєму складі домішок іншої фракції, а також аналіз втрат безпосередньо товарної фракції, або її забруднення нетоварною фракцією.

На ефективність розділення впливають також гідродинамічні параметри, які повинні забезпечувати оптимальні умови для проведення процесу, і в комплексі забезпечувати енергоефективну роботу обладнання. Різниця швидкостей газового потоку і частинок, являється рушійною силою процесу пневмокласифікації. Газовий потік характеризується двома основними гідродинамічними параметрами, швидкістю та витратою. При проектуванні пневмокласифікатора, враховується витрата газового потоку, завдяки якій отримуємо площу перетину корпусу на вході в апарат і виході із апарата. В свою чергу маючи площу перетину і витрату повітря можливо визначити значення швидкості газового потоку. Чим більша різниця швидкості газового потоку і швидкості частинок, тим більш можливе ефективне проведення процесу розділення сипкого матеріалу. Від правильно підібраної різниці швидкостей газового потоку і частинок конкретного матеріалу, які мають свою швидкість витання, буде залежати можливість проведення процесу розділення сипкого матеріалу на дрібну та крупну фракції, а потім вже ефективність процесу розділення. Для аналізу впливу гідродинамічних параметрів газового потоку на ефективність розділення, будується залежність втрат товарної фракції сипкого матеріалу від витрати газового потоку (рисунок 3.14) і від швидкості газового потоку(рисунок 3.15).

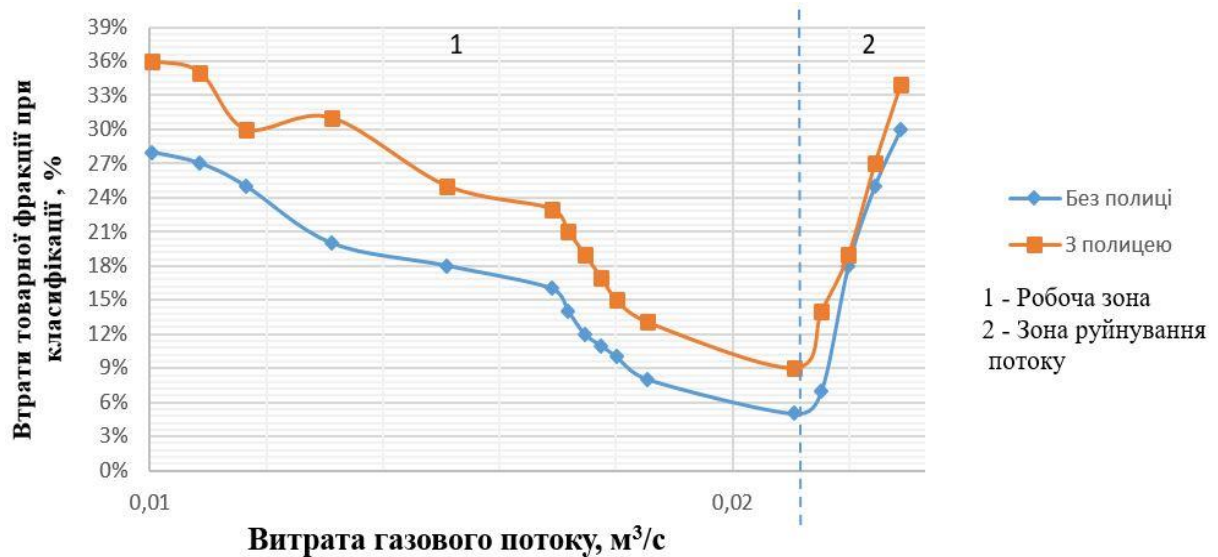


Рисунок 3.14 – Залежність втрат товарної фракції сипкого матеріалу від витрати газового потоку

Як видно із залежності (рисунок 3.14), отримуємо умовно 2 зони, в яких можна оцінити вплив витрати газового потоку. В першій зоні (робоча зона) спостерігається динаміка зменшення втрат крупної фракції і зменшення забрудненості крупної фракції дрібною фракцією зі збільшенням витрати газового потоку, що позитивно впливає на ефективність класифікації. Але ця тенденція зберігається поки витрата не перевищить $0,024748 \text{ м}^3/\text{с}$. При цій витраті отримаємо забруднення крупної фракції дрібною в межах 5%. При подальшому збільшенні витрати (зверх $0,024748 \text{ м}^3/\text{с}$), друга зона епюри (зона руйнування потоку), спостерігається поступовий розрив потоку, і винос частинок крупної фракції в збірник дрібної фракції. Коли витрата сягає $0,03 \text{ м}^3/\text{с}$, шар матеріалу руйнується повністю, і розділення не відбувається. Із залежності (рисунок 3.14) витікає, що через вплив полиці в секторі входу газового потоку збільшується забрудненість крупної фракції дрібною практично на 10%, і ця тенденція зберігається по всій висоті робочої зони апарату. Через викривлення газового потоку в точці входу, не достатньо висоти апарату для стабілізування потоку, а збільшення висоти не має сенсу, так як

збільшується металоємність конструкції, а також збільшуються гідравлічні втрати.

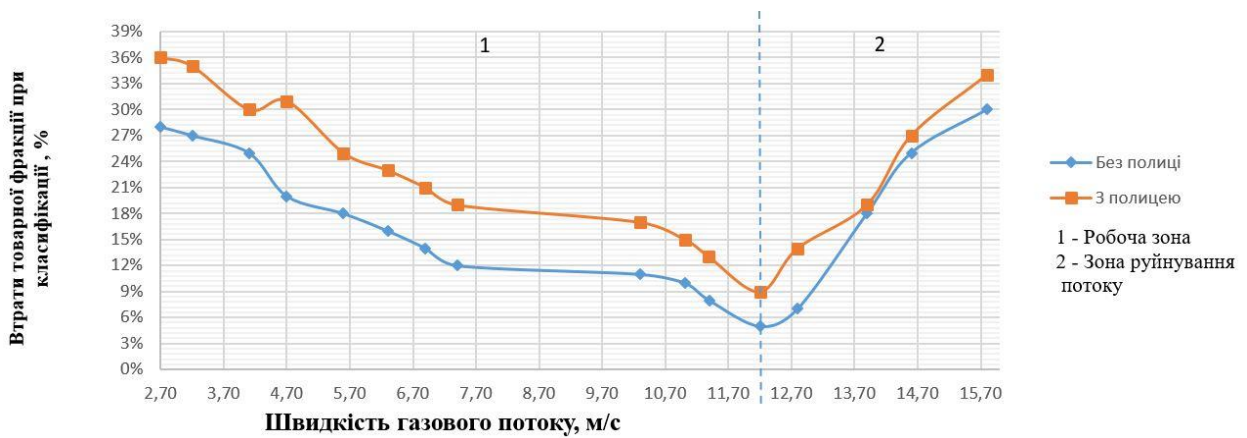


Рисунок 3.15 – Залежність втрат товарної фракції сипкого матеріалу від швидкості газового потоку

Залежність (рисунок 3.15) також має умовно 2 зони, в яких оцінюється вплив швидкості газового потоку на вході в апарат. В робочій зоні (до 12 м/с) при збільшенні швидкості газового потоку на вході, зменшується забрудненість крупної фракції дрібною фракцією, а крупна фракція не забруднює дрібну фракцію, відриваючись від шару матеріалу. Перехід в зону руйнування потоку трапляється при збільшенні швидкості газового потоку (більше 12 м/с). Від шару матеріалу поступово починають відриватися крупні частинки, які вилітають в збірник дрібної фракції, або ж скупчуються на певній висоті створюючи агломерати, які потім падають через потік забиваючи і дрібну і крупну фракцію. Подальше збільшення швидкості газового потоку призводить до повного унеможливлення процесу класифікації в зв'язку із повним руйнуванням потоку, і постійним виносом крупної фракції разом із дрібною з апарату. При порівнянні залежності (рисунок 3.13) і залежності (рисунок 3.15) витікає, що швидкість газового потоку, яка спостерігається в робочій зоні пневмокласифікатора, є достатньою для проведення ефективного розділення частинок різноманітних матеріалів на крупну і дрібну фракції.

3.4.2 Аналіз впливу часу дозавантаження і розвантаження обертаючогося шару матеріалу на якість розділення

Представлений процес пневмокласифікації циклічний, і ділиться на 2 цикли. В першому циклі здійснюється подача матеріалу в корпус за допомогою дозувального пристрою, а в другому циклі відбувається поступове розвантаження накопиченого в корпусі шару матеріалу. В процесі подачі матеріалу в робочій простір корпусу апарату, важливу роль відіграє час роботи дозувального пристрою. Від кількості матеріалу, який потрапить в апарат за проміжок часу буде залежати ефективність розділення.

Залежність (рисунок 3.16) показує, що в першій зоні (робоча зона) спостерігається зниження втрат товарної фракції зі зростанням часу дозавантаження шару матеріалу. Зменшення втрат відбувається до моменту, поки час дозавантаження не перевищує 20 секунд, а потім процес перетікає у другу зону (зона руйнування потоку), де втрати товарної фракції починають з часом зростати. Час дозавантаження впливає також на загальний час проходження процесу. В третій зоні (зона безперервного завантаження) матеріал подається в апарат безперервно, що зменшує загальний час проходження процесу, але ефективність класифікації при цьому не буде перевищувати 60%, тобто втрати товарної фракції досягнуть 35-40%.

Для оптимізації часу дозавантаження різних матеріалів, на основі отриманих експериментальних даних сформульовано залежність, що показує залежність часу дозавантаження від відношення крупної фракції частинок до дрібної фракції частинок (формула 3.1).

$$\tau = a \cdot \left(\frac{D_K}{D_D} \right)^n, \quad (3.1)$$

де a , n – експериментальні сталі, $a = 30,741$; $n = -1,348$;

D_K – мінімальний розмір частинок крупної фракції, мм; $D_K = \psi \cdot d_{cpK}$, де d_{cpK}

- середній розмір крупної фракції; ψ - коефіцієнт форми частинки;

D_D – мінімальний розмір частинок дрібної фракції, мм; $D_D = \psi \cdot d_{cpD}$, де d_{cpD}

- середній розмір дрібної фракції; ψ - коефіцієнт форми частинки.

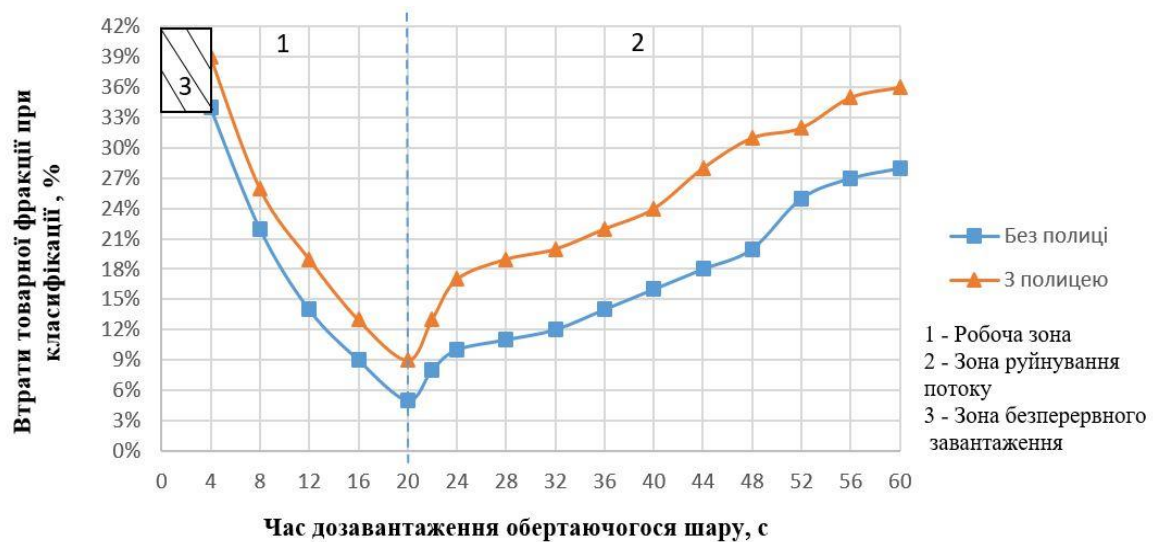


Рисунок 3.16 – Залежність втрат товарної фракції від часу дозавантаження обертаючого шару матеріалу на прикладі кварцового піску

Залежність (рисунок 3.17) показує, що чим більше відношення між граничним розміром крупної і дрібної фракції, тим менше часу потрібно на дозавантаження обертаючого шару матеріалу. Чим ближче знаходяться границі фракцій що розділяються, тим більше потрібно часу на дозавантаження подушки матеріалу

Збільшення часу дозавантаження дозволяє зменшити загальний час проходження процесу, але негативно відобразиться на ефективності, так як збільшаться втрати товарної фракції та забрудненість товарної фракції дрібною фракцією. Також пересичуючись матеріалом, обертаючий шар матеріалу буде поступово опускатися вниз, що призведе до перекривання входу газового

потіку, а газовий потік сконцентрувавшись під шаром матеріалу буде шукати вихід, і вибивати крупну фракцію разом з дрібною у виніс.

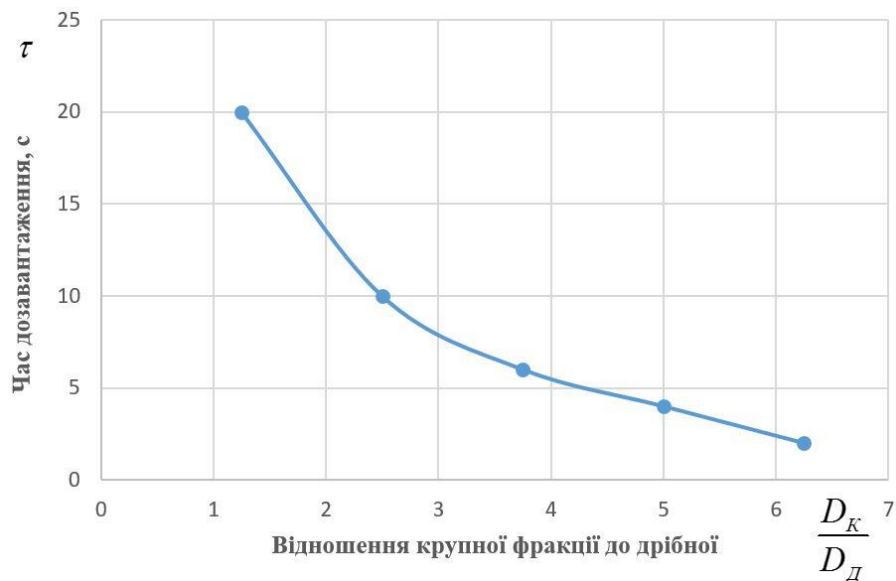


Рисунок 3.17 – Залежність втрат товарної фракції від часу дозавантаження обертаючогося шару матеріалу на прикладі кварцового піску

Другий цикл процесу класифікації пов'язаний із процесом розвантаження накопиченого шару матеріалу, який пройшов цикл дозавантаження матеріалом. Залежність (рисунок 3.18) показує, що в першій зоні (робоча зона) поступово знижуються втрати товарної фракції зі зростанням часу розвантаження шару. Зменшення втрат відбувається до моменту, поки час розвантаження не досягне 120 секунд, а потім процес перетікає у другу зону (зона руйнування потоку), де втрати товарної фракції починають поступово зростати.

Шар матеріалу повинен максимально розвантажитись до моменту наступного дозавантаження, і при цьому він не повинен втратити можливості обертатися, або зовсім зруйнуватись. Після 120 секунд розвантаження матеріалу, крива втрат починає поступово зростати. Зростання втрат незначне, але збільшення часу розвантаження негативно вплине на загальний час проведення процесу.

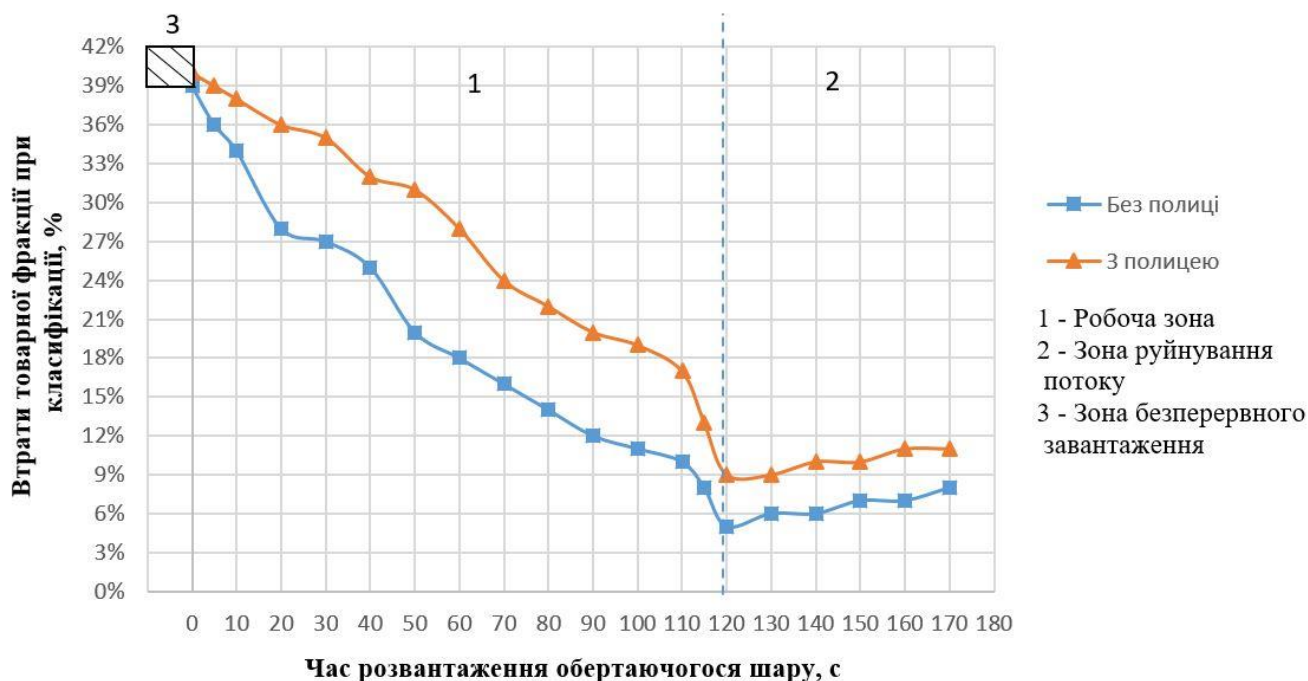


Рисунок 3.18 – Залежність втрат товарної фракції від часу розвантаження обертаючого шару матеріалу

Виходячи із отриманих даних, витікає, що для кожного циклу повинні бути підбрані оптимальні часові границі, що буде впливати на енергетичні затрати процесу і на його ефективність.

3.4.3 Оцінка ефективності пневмокласифікації різних матеріалів

Для оцінки ефективності пневмокласифікації, були поставлені експерименти з різними сипкими матеріалами на лабораторній моделі пневмокласифікатора. Підбравши оптимальні параметри процесу з урахуванням властивостей матеріалу та характеру домішок і його забрудненості, були отримані результати (таблиця 3.1 – 3.6), представлені у вигляді гістограм (рисунок 3.19 – 3.24).

Таблиця 3.1 – Результати розсіву по залишкам приготованої суміші річного піску

Параметр	Маса суміші, г	Фракція 0,16 - 0,2 мм, г	Фракція 0,4 – 0,63 мм, г
Річний пісок (початкова суміш)	1129,2	574,9	554,3
%	100	50,91	49,09
Збірник дрібної фракції	591,4	562,70	28,70
%	100	94,68	4,83
Збірник крупної фракції	526,1	22,50	503,60
%	100	4,28	95,71

Таблиця 3.2 – Результати розсіву по залишкам приготованої суміші карбаміду

Параметр	Маса суміші, г	Фракція 0,4 - 2 мм, г	Фракція 2 – 4 мм, г
Карбамід (початкова суміш)	3129,2	1524,6	1604,6
%	100	48,7	51,3
Збірник дрібної фракції	1559,6	1507,3	52,3
%	100	98,8	1,2
Збірник крупної фракції	1569,6	17,3	1552,3
%	100	1,1	98,9

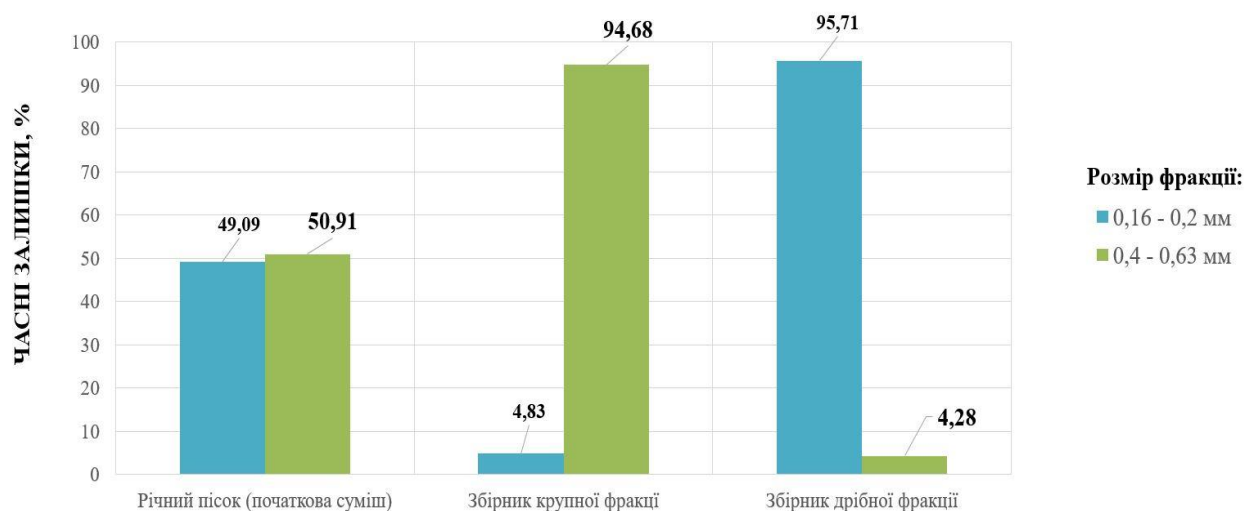


Рисунок 3.19 – Оцінка ефективності пневмокласифікації річного піску

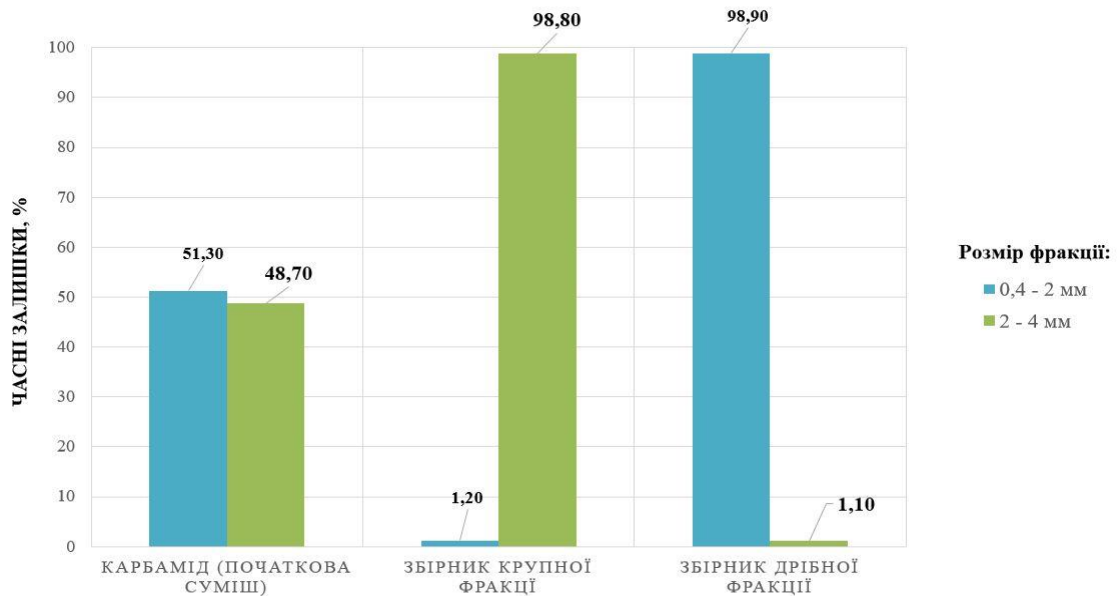


Рисунок 3.20 – Оцінка ефективності пневмокласифікації карбаміду

Таблиця 3.3 – Результати розсіву по залишкам приготованої суміші гречки

Параметр	Маса суміші, г	Фракція 0,4 – 2,5 мм, г	Фракція 2,5 – 3,2 мм, г
Гречка (початкова суміш)	2186	1124	1062
%	100	51,42	48,58
Збірник дрібної фракції	1046,5	1044,2	2,3
%	100	99,78	0,22
Збірник крупної фракції	1139,5	12,00	1127,50
%	100	1,05	98,95

Таблиця 3.4 – Результати розсіву по залишкам приготованої суміші проса

Параметр	Маса суміші, г	Фракція 0,4 - 2 мм, г	Фракція 2 – 2,4 мм, г
Просо (початкова суміш)	2983	1485	1498
%	100	49,78	50,22
Збірник дрібної фракції	1509	1472	37
%	100	97,55	2,45
Збірник крупної фракції	1474	13,00	1461,00
%	100	0,88	99,12

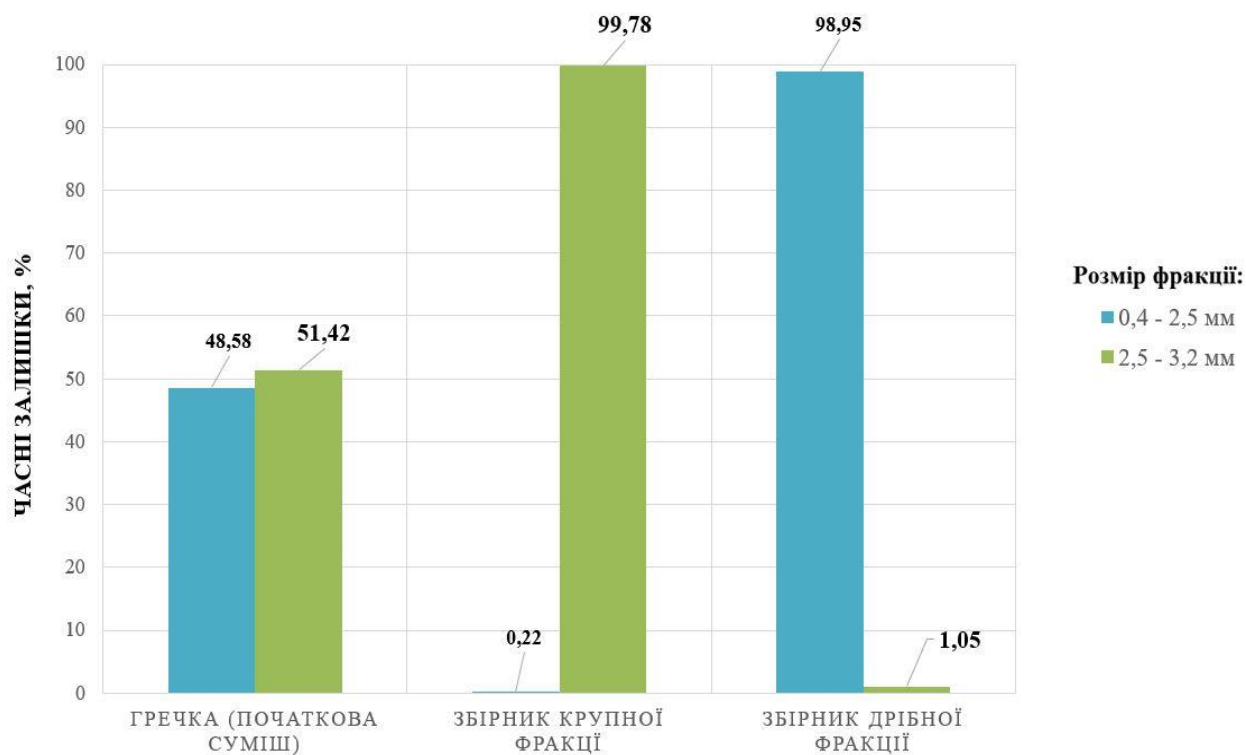


Рисунок 3.21 – Оцінка ефективності пневмокласифікації гречки

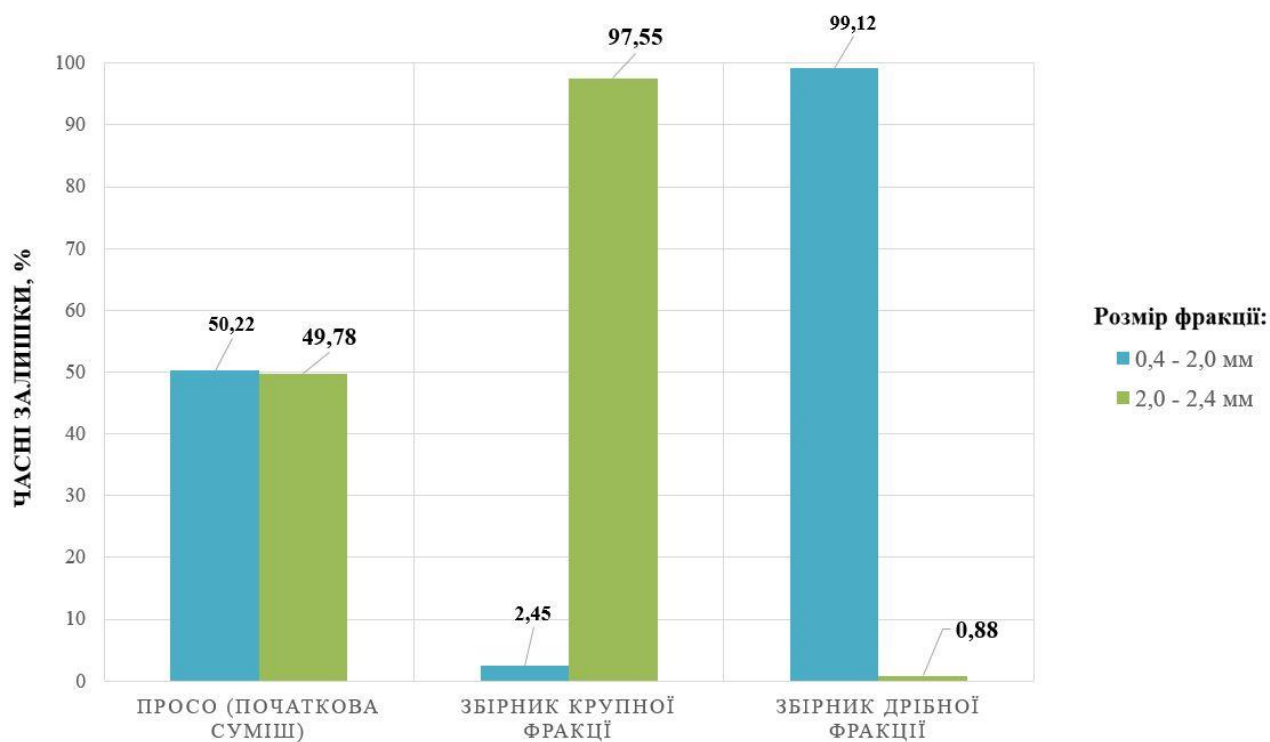


Рисунок 3.22 – Оцінка ефективності пневмокласифікації проса

Таблиця 3.5 – Результати розсіву по залишкам приготованої суміші насіння моркви

Параметр	Маса суміші, г	Фракція 0,4 – 1,6 мм, г	Фракція 1,6 – 2,4 мм, г
Морква (початкова суміш)	2312	1210	1102
%	100	52,34	47,66
Збірник дрібної фракції	1100,8	1058	42,8
%	100	96,11	3,89
Збірник крупної фракції	1211,2	44,00	1167,20
%	100	3,63	96,37

Таблиця 3.6 – Результати розсіву по залишкам приготованої суміші насіння редису

Параметр	Маса суміші, г	Фракція 0,4 – 2,1 мм, г	Фракція 2,1 - 3 мм, г
Редис (початкова суміш)	2216	1112	1104
%	100	50,18	49,82
Збірник дрібної фракції	1101,8	1099	2,8
%	100	99,75	0,25
Збірник крупної фракції	1139,5	13,20	1101,00
%	100	1,18	98,82

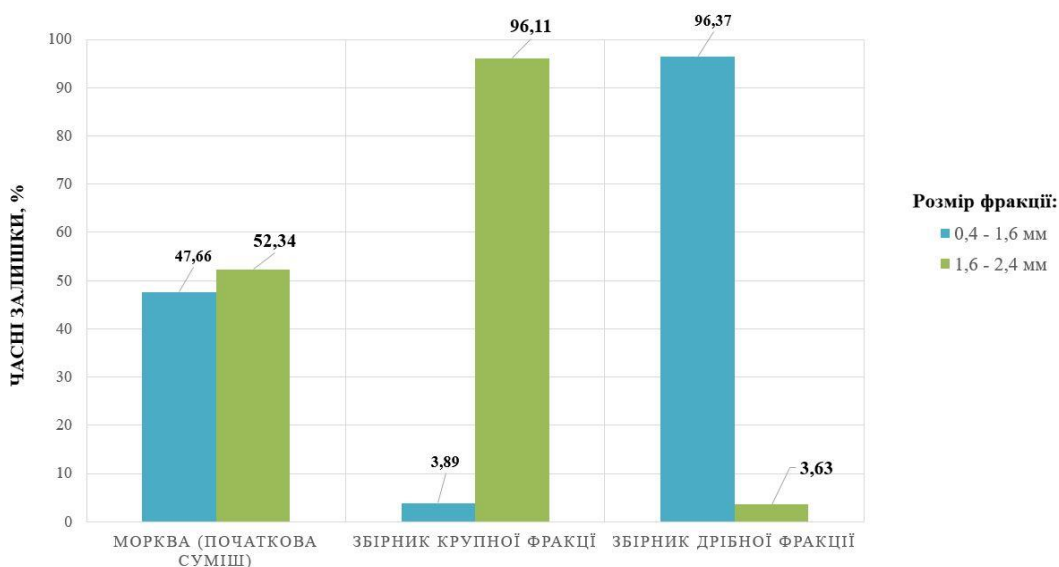


Рисунок 3.23 – Оцінка ефективності пневмокласифікації насіння моркви

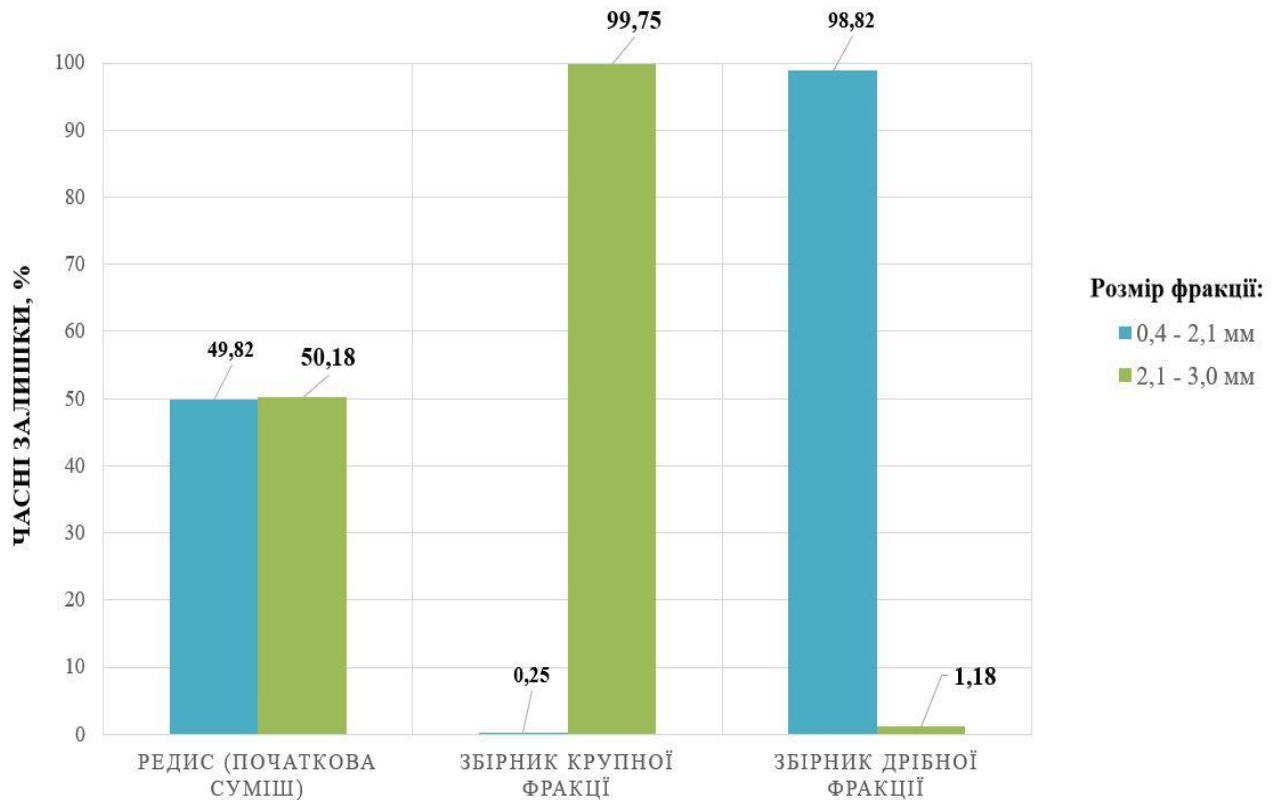


Рисунок 3.24 – Оцінка ефективності пневмокласифікації насіння редису

Представлені гістограми (рисунок 3.19 – 3.24) відображають можливість ефективного розділення в «ромбічному» пневмокласифікаторі сумішей різноманітних сипких матеріалів, які різняться за розміром, формою, густиною та швидкістю витання. 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 навіть збільшиться. Забрудненість крупної фракції дрібною не перевищують 5%, розглядаючи пісочну суміш, а відносно інших матеріалів тільки зменшується. Тобто даний апарат забезпечує достатню ефективність розділення полідисперсної суміші різноманітних сипких матеріалів.

Висновки до третього розділу

1. Розроблена фізична модель процесу пневмокласифікації, яка пояснює створення завислого обертаючого шару та обґрунтовує періодичність розвантаження шару матеріалу та дозавантаження шару матеріалу.

2. Отримані епюри швидкості однофазного потоку, аналіз котрих показує вплив полички в секторі загрузки на характер руху твердих частинок та особливості завислого шару в робочому об'ємі корпусу апарату.

3. Проведені експериментальні дослідження швидкостей витання сипких матеріалів з різними фізичними та геометричними параметрами дозволили оцінити можливості їх ефективного розділення в пневмокласифікаторі.

4. Запропоновано циклічний метод проведення процесу, перший цикл якого складається із дозавантаження завислого шару вихідним матеріалом протягом 15 – 20 секунд, а другий із поступового розвантаження накопиченого в корпусі шару матеріалу протягом 120 - 130 секунд.

5. Обґрунтовані фактори, які впливають на гідродинаміку апарату, а саме форма корпусу – ромбічна, кути розкриття стінок корпусу – в межах 8° - 9° , а кути закриття – в межах 10° - 11° .

6. Проведені експериментальні дослідження впливу витрати газового потоку та швидкості газового потоку на ефективність розділення сипкого матеріалу, показали наявність двох зон: робочої зони, в якій спостерігається динаміка зменшення втрат крупної фракції і зменшення забрудненості крупної фракції дрібною фракцією зі збільшенням витрати та швидкості газового потоку; зони руйнування потоку в якій спостерігається збільшення втрат крупної фракції зі збільшенням витрати та швидкості газового потоку.

7. Показана можливість ефективного розділення різноманітних сипких матеріалів, тобто показник забруднення крупної фракції дрібною фракцією і навпаки не перевищує 5%.

Основні результати опубліковано в роботі [151, 152].

РОЗДІЛ 4

МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ГІДРОДИНАМІКИ РУХУ ГАЗОДИСПЕРСНОГО ПОТОКУ ТА ПРОЦЕСУ ПНЕВМОКЛАСИФІКАЦІЇ

Пневмокласифікатори характеризуються достатньо специфічними умовами процесу, тому в даний час існують лише аналітичні залежності, які носять емпіричний характер стосовно конкретних умов процесу та конструкції апарата. Зважаючи на це, на підприємствах виникають певні труднощі при використанні пневмокласифікаторів в технологічних процесах.

Основною проблемою при експлуатації пневмокласифікаторів являється недостатня вивченість гідродинаміки руху частинок в апараті, а також самого процесу розділення частинок. Математична модель дозволяє встановити та оптимізувати режимно-технологічні параметри процесу, а також проводити порівняння експериментальних даних отриманих під час випробувань, з розрахунковими, отриманими за допомогою аналітичних залежностей математичної моделі.

При розробці математичної моделі слід зауважити, що в робочому об'ємі пневмокласифікатора в одиницю часу перебуває велика кількість частинок. Частинки відрізняються розмірами, формою, характером і напрямом свого руху. В процесі свого руху частинки зіштовхуються між собою, частково перетираються, змінюють свою траєкторію відштовхуючись від стінок та регулярно змінюють свою швидкість. Частина фракції постійно відводиться, а шар матеріалу періодично поновлюється новими порціями матеріалу [157].

У даному розділі приведені теоретичні основи математичного аналізу гідродинаміки руху частинок та процесу розділення на фракції сипкого матеріалу в апаратах для пневматичної класифікації. Отримані аналітичні залежності, які 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.

4.1 Гідродинаміка руху однофазного потоку

Розглянемо вертикальний рух газового потоку по осі Z у вертикальному каналі, що розширюється (рисунок 4.1).

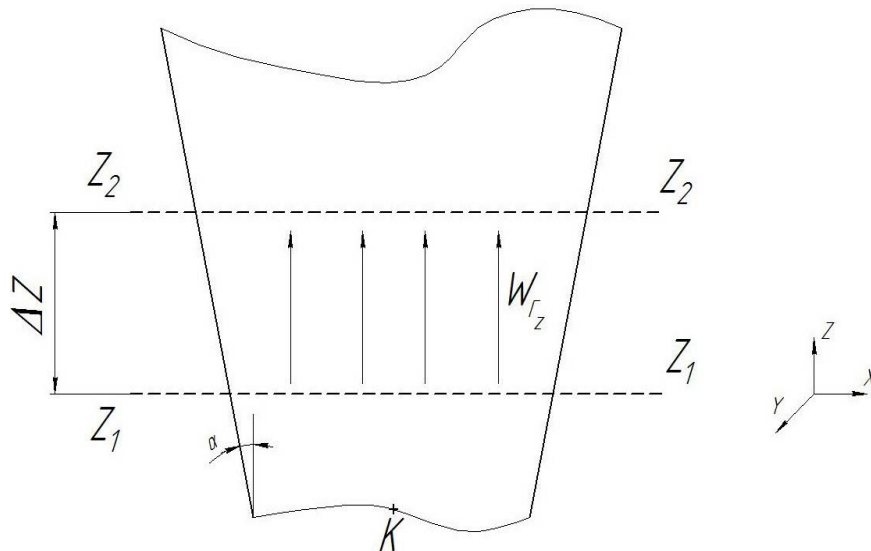


Рисунок 4.1 – Схема вертикального руху газового потоку в каналі, що розширюється

За час $\Delta\tau$ об'єм потоку із положення $Z_1 - Z_1$ переміститься в положення $Z_2 - Z_2$, при цьому відстань між перетинами буде відповідати ΔZ .

Змінення кількості руху газової фази:

$$\Delta(m_{\Gamma}W_{\Gamma}) = (-P_{\Gamma} - F_{TP_{\Gamma}})\Delta z\Delta\tau, \quad (4.1)$$

де W_{Γ} - швидкість газової фази у вертикальному напрямку по осі Z , м/с,

m_{Γ} - маса газового компонента, кг;

P_{Γ} - масова сила, діюча на газоподібний компонент, Н/м,

$F_{TP_{\Gamma}}$ - сили тертя газового потоку об стінки апарату, Н/м.

Маса газового компонента, який рухається між перетинами, виражається як:

$$m_{\Gamma} = S \rho_{\Gamma} \Delta z, \quad (4.2)$$

де S - площа поперечного перетину каналу, м²,

ρ_{Γ} - густина газової фази, кг/м³.

Вважаючи, що масова витрата газової фази є постійною величиною:

$$S \cdot W_{\Gamma z} \cdot \rho_{\Gamma} = const, \quad (4.3)$$

рівняння (4.1) буде мати наступний вигляд:

$$S \rho_{\Gamma} \frac{dW_{\Gamma z}}{d\tau} = -P_{\Gamma} - F_{TP_{\Gamma}}, \quad (4.4)$$

Представимо в рівнянні (4.4):

$$\frac{dW_{\Gamma z}}{d\tau} = W_{\Gamma z} \frac{dW_{\Gamma z}}{dz},$$

отримуємо:

$$S \rho_{\Gamma} W_{\Gamma z} \frac{dW_{\Gamma z}}{dz} = -P_{\Gamma} - F_{TP_{\Gamma}}, \quad (4.5)$$

де сили дорівнюють:

$$P_{\Gamma} = S \rho_{\Gamma} g (1 - \Delta \rho), \quad (4.6)$$

$$F_{TP_{\Gamma}} = \lambda_{TP} \frac{S}{D_{\ominus}} \frac{\rho_{\Gamma} W_{\Gamma z}^2}{2}, \quad (4.7)$$

де g - прискорення вільного падіння, м/с²;

λ_{TP} - коефіцієнт тертя газового потоку об стінки каналу;

D_{\ominus} - еквівалентний діаметр каналу, м;

$\Delta \rho$ - відношення густин газу зовні і всередині каналу.

Оскільки температура повітря всередині каналу і ззовні однакова, то масова сила діюча на газовий потік, урівноважується Архімедовою силою і вплив масових сил досить незначний. Тоді $\Delta \rho = 1$, і відповідно $P_{\Gamma} = 0$.

Тоді рівняння (4.5) з урахуванням рівняння (4.7) матиме вигляд:

$$\rho_{\Gamma} W_{\Gamma z} \frac{dW_{\Gamma z}}{dz} = - \frac{\lambda_{TP}}{D_{\ominus}} \frac{\rho_{\Gamma} W_{\Gamma z}^2}{2}, \quad (4.8)$$

За формулою Дарсі-Вейсбаха коефіцієнт тертя залежить від режиму руху рідини $\lambda_{TP} = f(\text{Re})$ [130].

Тобто

$$\lambda_{TP} = \frac{C}{Re^n}, \quad (4.9)$$

де C ; n - експериментальні коефіцієнти ($0 \leq n \leq 1$), які залежать від числа Рейнольдса (Re).

Алгоритм визначення швидкості газового потоку, значення якої входить у формулу (4.8) представлений у додатку Б.

Для оцінювання значень коефіцієнтів визначається сумарне квадратичне відхилення R теоретичних значень швидкості потоку w_H від відповідних експериментальних значень w_K .

Визначаємо постійну C з залежності $R(C, n)$:

$$R(C, n) = \sum_{k=1}^N \left[w_H^{-n} - w_K^{-n} \right]^2 \rightarrow \min, \quad (4.10)$$

Проведемо перетворення:

$$R = \sum \left[w_0^n - \frac{Cv^n}{2\theta} \left(\frac{1}{d_0^n} - \frac{1}{d_K^n} \right) - w_K^n \right]^2 \rightarrow \min, \quad (4.11)$$

Умова стаціонарності (мінімуму) сумарного квадратичного відхилення:

$$\frac{\partial R}{\partial C} = -2 \sum \left[w_0^n - \frac{Cv^n}{2\theta} \left(\frac{1}{d_0^n} - \frac{1}{d_K^n} \right) - w_K^n \right] \cdot \frac{v^n}{2\theta} \left(\frac{1}{d_0^n} - \frac{1}{d_K^n} \right) = 0, \quad (4.12)$$

$$\sum \left[(w_0^n - w_K^n) \left(\frac{1}{d_0^n} - \frac{1}{d_K^n} \right) \right] = \frac{Cv^n}{2\theta} \cdot \sum \left(\frac{1}{d_0^n} - \frac{1}{d_K^n} \right)^2, \quad (4.13)$$

У результаті отримаємо залежність для визначення коефіцієнта C :

$$C = \frac{2\theta}{\nu^n} \cdot \frac{\sum \left(\frac{1}{d_0^n} - \frac{1}{d_k^n} \right) (w_0^n - w_k^n)}{\sum \left(\frac{1}{d_0^n} - \frac{1}{d_k^n} \right)^2}, \quad (4.14)$$

де θ - кут розкриття ромбу, град;

ν - кінематична в'язкість, м²/с;

d_0 – еквівалентний діаметр початковий перетин апарату, м;

d_k – еквівалентний діаметр перетину апарату в точці k , м (рисунок 4.1).

Нахил стінки проточної частини:

$$\theta = \frac{D_1^{\max} - d_0^n}{H_1} = \operatorname{tg} \alpha, \quad (4.15)$$

де D_1^{\max} - максимальна ширина перетину каналу, м;

H_1 - висота каналу, м;

α - кут нахилу стінки апарату, град.

Знайдемо функцію похибки $R(n)$:

$$R(n) = \sum_{k=1}^N \left[\left[w_0^n - \frac{C_{(n)} \nu^n}{2\theta} \left(\frac{1}{d_0^n} - \frac{1}{d_k^n} \right) \right]^{\frac{1}{n}} - w_k^n \right]^2, \quad (4.16)$$

Використовуючи формулу (4.16), будемо графік залежності похибки $R(n)$ від значення експериментального коефіцієнту (n) (рисунок 4.2):

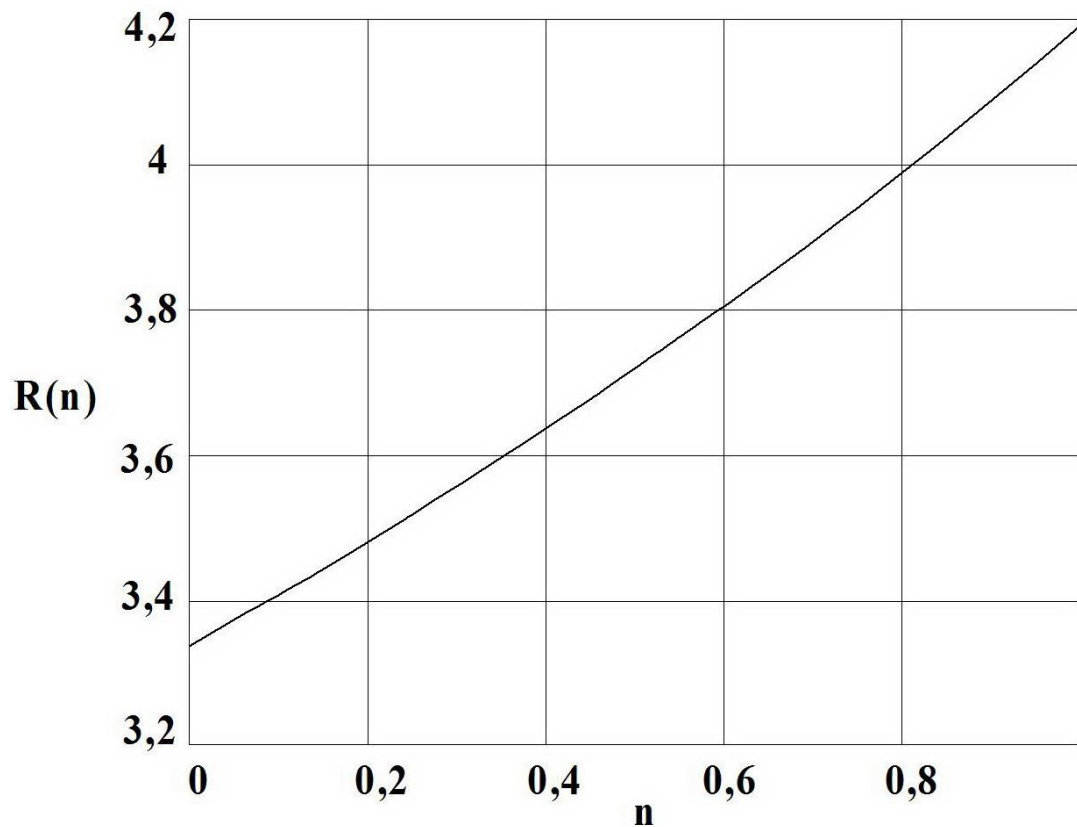


Рисунок 4.2 – Залежність похибки R(n) від значення коефіцієнту (n)

З графіка (рисунок 4.2) видно, що похибка буде мінімальна коли $n = 0$. Отже режим руху газового потоку – розвинений турбулентний. Це означає, що проводити розрахунки використовуючи формулу (4.14) при умові $n \neq 0$ неможливо, оскільки похибка більша (Додаток Б). Тому, для випадку коли $n = 0$, розрахунки мають проводитись по наступній формулі:

$$R(c) = \sum_{k=1}^N \left[w_1 \cdot \left(\frac{d_k}{d_1} \right)^{\frac{c}{2\theta}} - w_k^n \right]^2, \quad (4.17)$$

Використовуючи формулу (4.17), будуюмо графік залежності похибки R(c) від значення експериментального коефіцієнту (c):

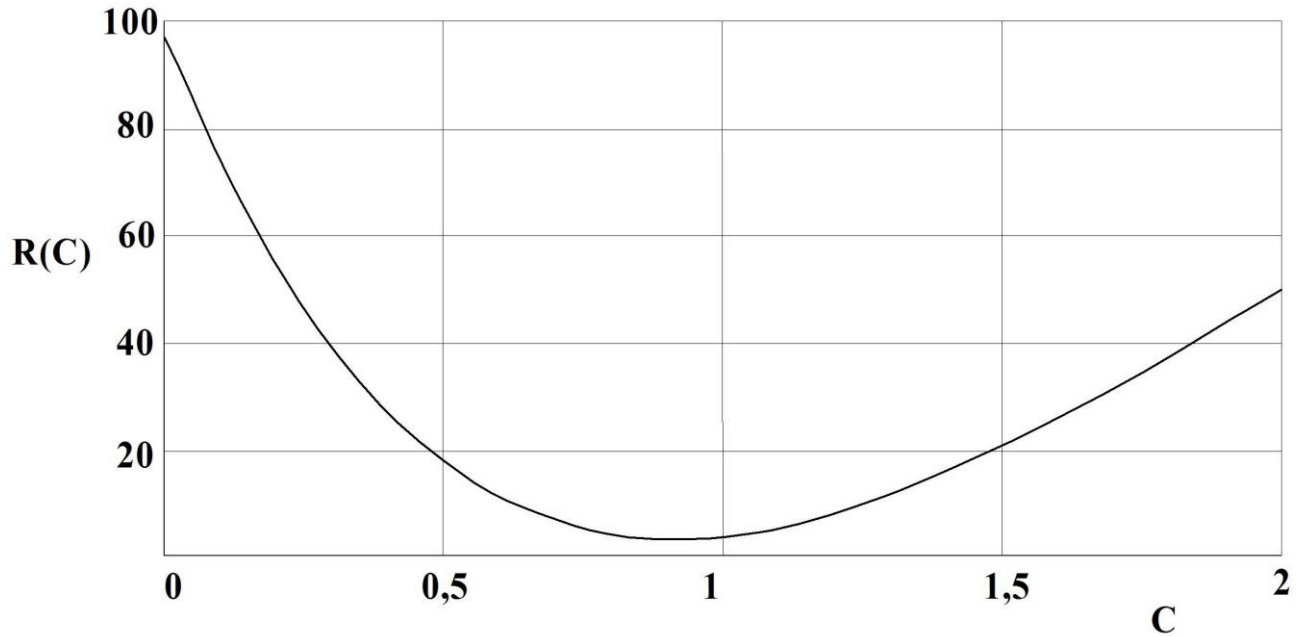


Рисунок 4.3 – Залежність похибки $R(c)$ від значення коефіцієнту (C)

З графіка (рисунок 4.3) видно, що мінімальне значення похибки забезпечує прагнення експериментального коефіцієнту C до одиниці. Тому для розрахунку коефіцієнта C використовуємо наступну формулу:

$$C = 2\theta \cdot \frac{\sum_{k=1}^N \left(\ln \left(\frac{d_1}{d_k} \right) \ln \left(\frac{w_k}{w_1} \right) \right)}{\sum_{k=1}^N \left(\ln \left(\frac{d_1}{d_k} \right) \right)^2}, \quad (4.18)$$

Знайшовши значення коефіцієнта C , маємо змогу визначити швидкість газового потоку по висоті апарату:

$$W_{\Gamma} = w_0 \cdot \left[\frac{d_k}{d_1} \right]^{-\frac{C}{2\theta}}, \quad (4.19)$$

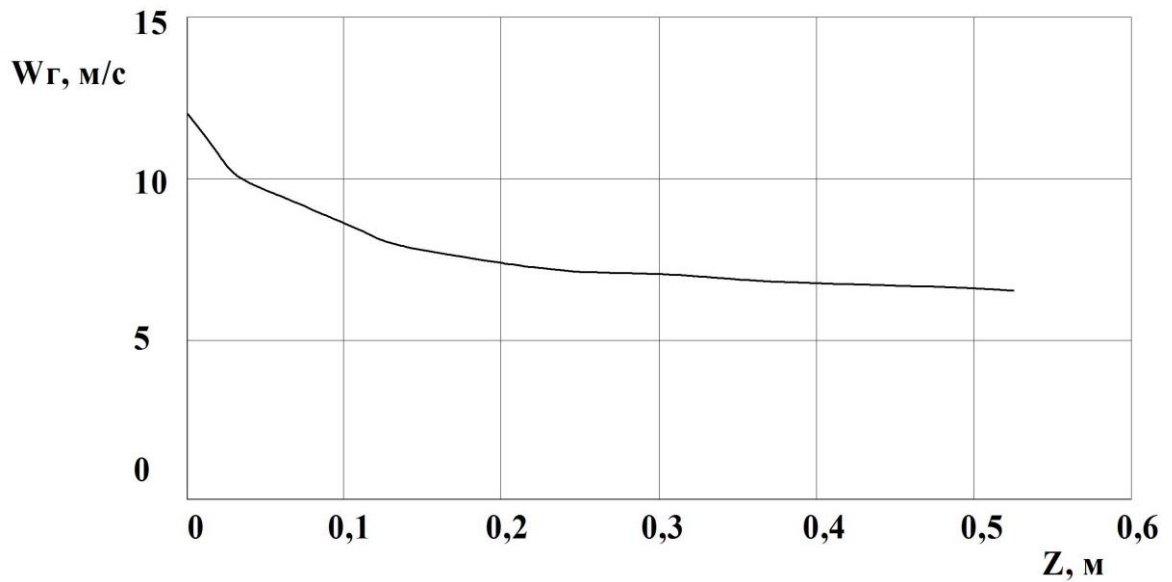


Рисунок 4.4 – Залежність зміни швидкості газового потоку по висоті робочого простору апарату

Вирішення рівняння (4.19) дає змогу визначити значення швидкості вихідного газового потоку у різних точках по осі вертикального каналу, що розширяється. Тобто отримуємо епюру зміни швидкостей газового потоку в каналі по осі Z (рисунок 4.4).

Процедура реалізації алгоритму розрахунку наведена в додатку Б.

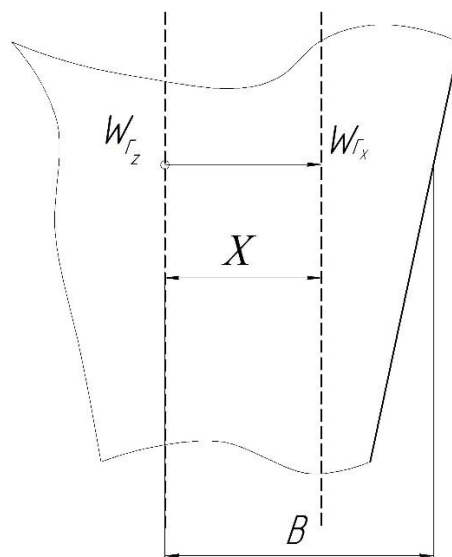


Рисунок 4.5 – Схема, щодо визначення горизонтальної складової швидкості

Зміну швидкості газового потоку, по осі X (рисунок 4.5.) розраховуємо по рівнянню виду [119]:

$$W_{\Gamma_x} = W_{\Gamma_z} \left(1 - \frac{X}{B}\right)^{\frac{1}{n}}, \quad (4.20)$$

де X - координати точки по перетину каналу, в якій проводять розрахунки значення швидкості газового потоку W_{Γ_x} по осі X , м;

B - довжина перетину каналу, м.

Визначаємо експериментальну сталу n з умови мінімуму сумарного квадратичного відхилення теоретичних значень швидкостей потоку від відповідних експериментальних значень. У результаті отримуємо:

$$n = \frac{\sum_{m=1}^M \left(\ln \left(1 - \frac{x_m}{B} \right) \ln \left(\frac{w_{x_m}}{w_1} \right) \right)}{\sum_{m=1}^M \left(\ln \left(\frac{w_{x_m}}{w_1} \right) \right)^2}, \quad (4.21)$$

Тоді, використовуючи формулу (4.20) будуємо графік залежності зміни швидкості газового потоку по ширині робочого простору апарату. Для більш наглядного відображення, будуємо графіки відносно сегменту входу в апарат (рисунок 4.6).

Визначаємо траєкторії руху газового потоку без навантаження матеріалом:

$$z_{(x, x_0)} = \frac{B \cdot n}{n-1} \left[\left(1 - \frac{x_0}{B}\right)^{\frac{n-1}{n}} - \left(1 - \frac{x}{B}\right)^{\frac{n-1}{n}} \right], \quad (4.22)$$

де x_0 - координати точки входу повітряного потоку в робочій простір апарату по осі X , м.

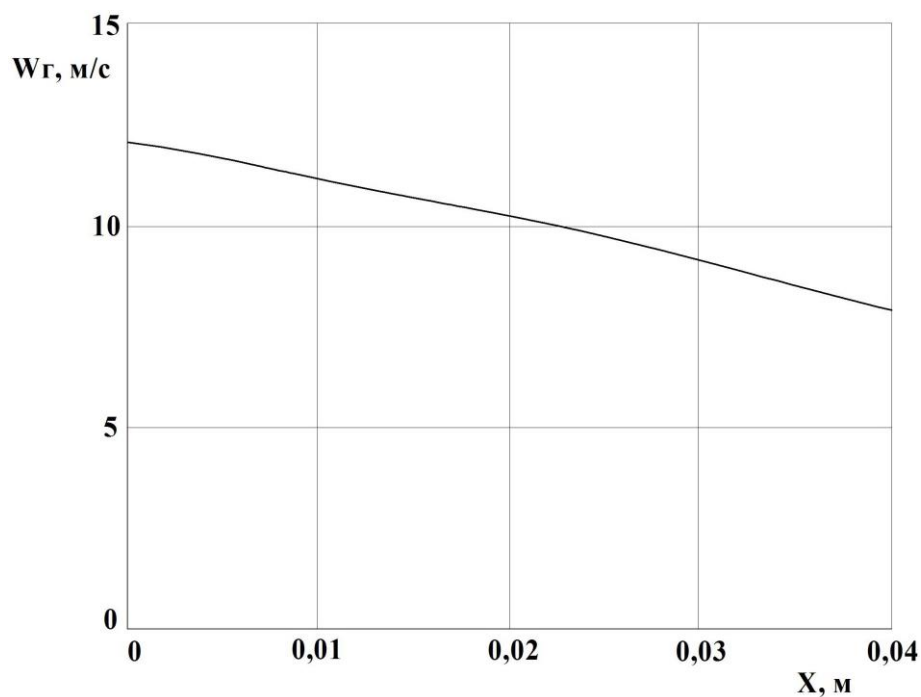


Рисунок 4.6 – Залежність зміни швидкості газового потоку по ширині робочого простору апарату

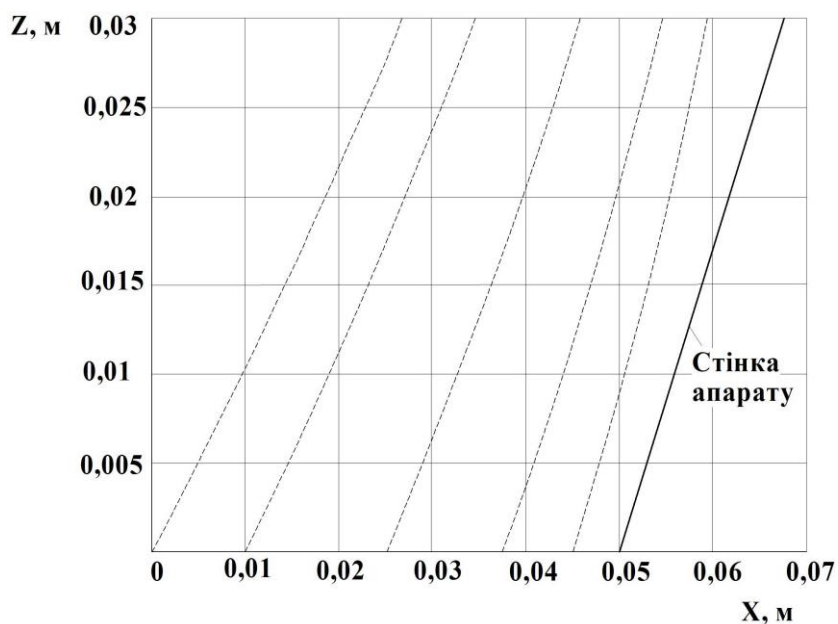


Рисунок 4.7 – Лінійний току газу в ненавантаженому робочому просторі апарату

Отримані рішення рівнянь (4.18 – 4.21) 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 розділення полідисперсної суміші зернистих матеріалів. Рівняння (4.22) дає змогу оцінити траєкторію руху газу в робочому просторі апарату (рисунок 4.7), що дає можливість оцінити вплив кутів розкриття ромбу на зміни в русі газового потоку.

4.2 Гідродинаміка руху окремої частинки у газовому потоці

Розглянемо динаміку висхідного руху одиничної шароподібної твердої частинки в вертикальному каналі, що розширюється (рисунок 4.1, рисунок 4.5). Такі умови реалізуються при припущенні незначної величини об'ємної концентрації ($\beta < 0,005-0,01 \text{ м}^3/\text{ м}^3$) [118]. Припускаємо, що змінення швидкості в поперечному напрямку не відбувається. Тому силами зіткнення частинок одна з одною, зі стінками апарату, інерції та тертя, враховуючи їх незначну концентрацію, можна знехтувати.

Тоді рівняння, яке описує рух частинки в вертикальному напрямку Z і горизонтальному напрямку X , має наступний вигляд [15]:

$$\begin{cases} m_T \frac{dU_{Tz}}{d\tau} = -m_T g + S_T \zeta \frac{\rho_\Gamma (W_\Gamma - U_{Tz})^2}{2} \\ m_T \frac{dU_{Tx}}{d\tau} = S_T \zeta \frac{\rho_\Gamma (W_\Gamma - U_{Tx})^2}{2} \end{cases}, \quad (4.23)$$

де m_T - маса твердої частинки, кг;

U_T - швидкість твердої частинки, м/с;

S_T - площа міделевого перетину шароподібної частинки, м²;

ζ - коефіцієнт гідродинамічного опору, $\zeta = f(\text{Re}_T)$;

Re_T - критерій Рейнольдса відносно двофазного потоку.

При турбулентному режимі руху твердої частинки, в умовах $\text{Re}_T > 800 - 1000$, $\zeta = 0,44$ [118].

Зробивши перетворення системи рівнянь (4.23) отримаємо:

$$\begin{cases} U_{T_z} \frac{dU_{T_z}}{dZ} = -g + \frac{3}{4} \zeta \frac{\rho_\Gamma (W_\Gamma - U_{T_z})^2}{\rho_T d_T} \\ U_{T_x} \frac{dU_{T_x}}{dX} = \frac{3}{4} \zeta \frac{\rho_\Gamma (W_\Gamma - U_{T_x})^2}{\rho_T d_T} \end{cases}, \quad (4.24)$$

Беремо перше рівняння з системи рівнянь (4.24), й інтегруємо його методом Рунге-Кутта 4-го порядку для граничного значення швидкості $U_{T_z} = 0$. Відповідний градієнт:

$$D_z(z, U_{T_z}) = \frac{-g + \frac{3}{4} \zeta \frac{\rho_\Gamma (W_{\Gamma_z} - U_{T_z})^2}{\rho_T d_T}}{U_{T_z}}, \quad (4.25)$$

де ρ_T - густина твердої частинки, кг/м³;

d_T - діаметр твердої частинки, мм;

W_{Γ_z} - швидкість газового потоку по осі Z згідно рівняння (4.19), м/с.

Отримуємо значення швидкості частинки (додаток В) у вертикальному напрямку робочого простору апарату (U_{T_z}) під дією газового потоку (W_{Γ_z}) (рисунок 4.8).

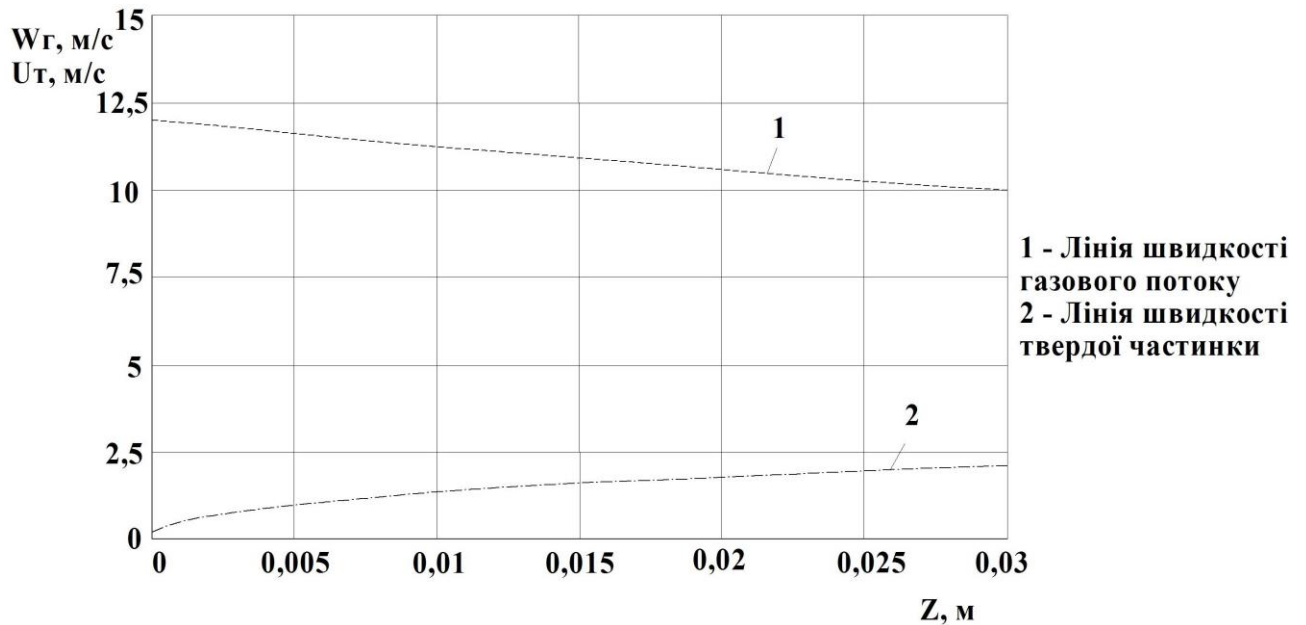


Рисунок 4.8 – Залежність зміни швидкості руху твердої частинки в вертикальному напрямку робочого простору апарату (U_{Tz}) під дією газového потоку ($W_{Гz}$)

Беремо друге рівняння з системи рівнянь (4.24), й інтегруємо його методом Рунге-Кутта 4-го порядку для граничного значення швидкості $U_{Tx} = 0$. Відповідний градієнт:

$$D_x(x, U_{Tx}) = \frac{\frac{3}{4} \zeta \frac{\rho_G (W_{Гx} - U_{Tx})^2}{\rho_T d_T}}{U_{Tx}}, \quad (4.26)$$

де $W_{Гx}$ - швидкість газového потоку по осі X згідно рівняння (4.20), м/с.

Отримуємо значення швидкості частинки (додаток В) у горизонтальному напрямку робочого простору апарату (U_{Tx}) під дією газového потоку ($W_{Гx}$) (рисунок 4.9).

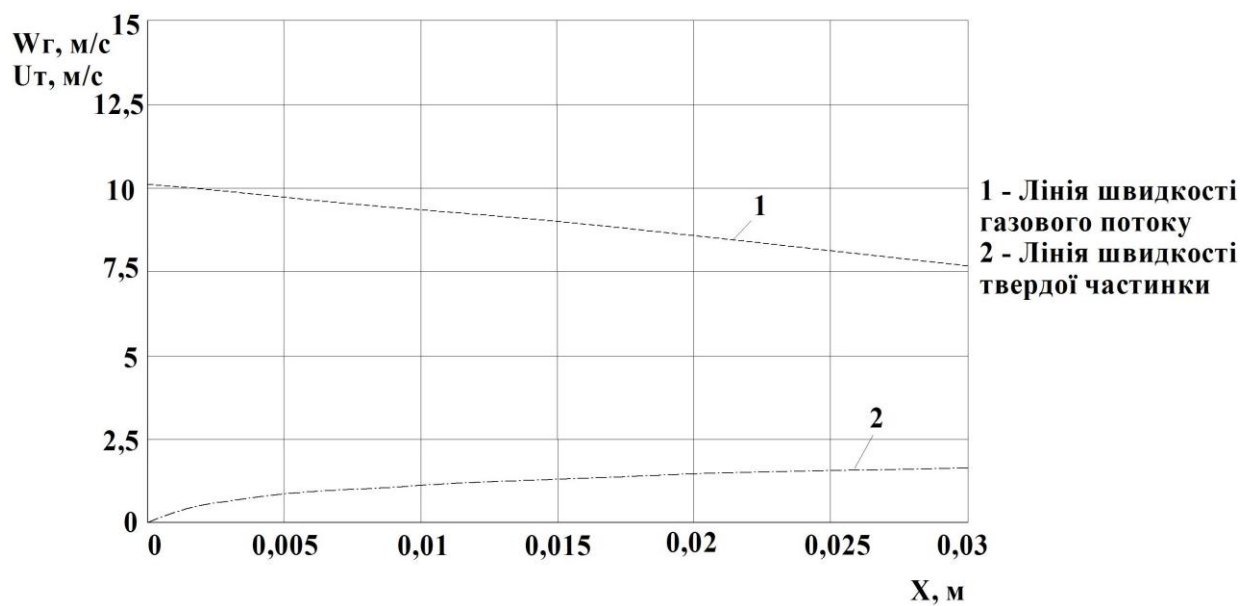


Рисунок 4.9 – Залежність зміни швидкості руху твердого частинки у горизонтальному напрямку робочого простору апарату (U_{T_x}) під дією газового потоку (W_{G_x})

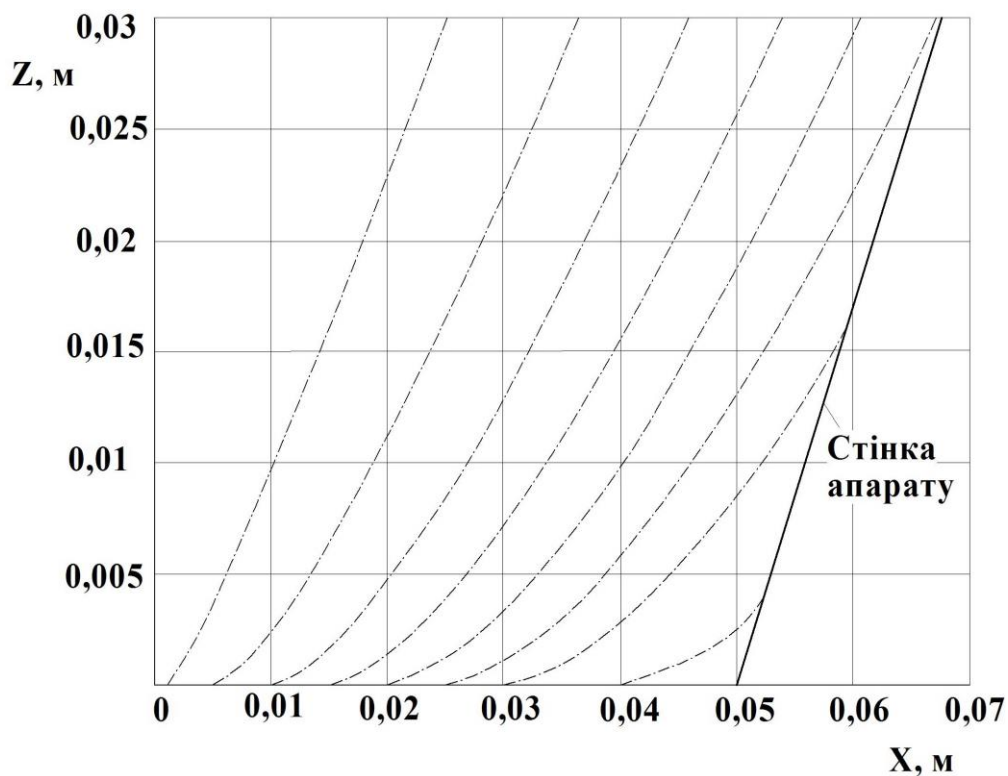


Рисунок 4.10 – Траєкторії руху твердого частинки в ненавантаженому апараті

Отримані значення швидкості частинки у вертикальному і горизонтальному напрямку дають можливість визначити траєкторії частинок у проточній частині апарату, а також оцінити зміни швидкості одиночної частинки по висоті та ширині корпусу.

З представлених (рисунок 4.10) 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.

4.3 Гідродинаміка руху двофазних потоків

Розглянемо вертикальний рух матеріалу в каналі, що розширюється (рисунок 4.11).

Змінення кількості руху твердої фази і газової фази відповідно дорівнює імпульсу діючих на них сил:

$$\Delta(m_T U_{T_z}) = (P_T - F_{TP_T} - F_{II}) \Delta Z \Delta \tau \quad (4.27)$$

$$\Delta(m_G W_{G_z}) = (P_G - F_{TP_G} + F_{II}) \Delta Z \Delta \tau \quad (4.28)$$

де U_{T_z} - швидкість твердої частинки по осі Z згідно рівняння (4.23), м/с;

W_{G_z} - швидкість газового потоку по осі Z згідно рівняння (4.19), м/с;

P_T, P_G - масові сили, діючі на твердий і газоподібний компонент, Н/м;

F_{TP_T}, F_{TP_G} - сили тертя компонентів об стінки апарату, Н/м;

F_{II} - сила аеродинамічної взаємодії твердої фази з обтікаючим її газовим потоком, Н/м.

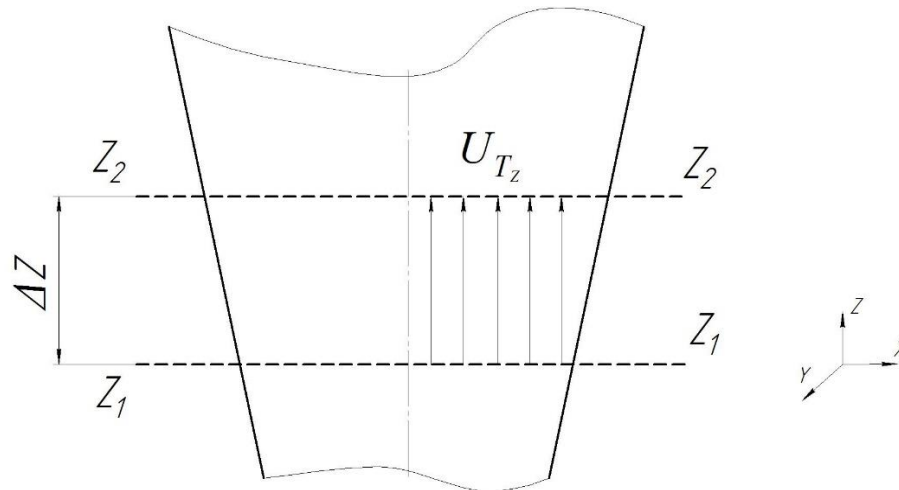


Рисунок 4.11 – Схема вертикального руху матеріалу в каналі, що розширюється

Зазначені сили в рівняннях (4.27) і (4.28) віднесені до одиниці висоти каналу. Маса компонентів двофазного потоку, обертаючихся між перетинами $Z_1 - Z_1$ і $Z_2 - Z_2$ виражається:

$$m_T = S \beta \rho_T \Delta z \quad (4.29)$$

$$m_G = S (1 - \beta) \rho_G \Delta z \quad (4.30)$$

де S - площа поперечного перетину каналу, м²;

β - об'ємна концентрація твердої фази м³/ м³;

ρ_T, ρ_G - густина твердої і газової фази відповідно, кг/м³,

Вважаємо, що масові витрати твердої фази і газової фази постійні.

$$SU_T \beta \rho_T = \text{const} \quad (4.31)$$

$$SW_T \rho_T (1 - \beta) = \text{const} \quad (4.32)$$

Тоді згідно з рівняннями (4.31) та (4.32) рівняння (4.27) і (4.28) матимуть вигляд:

$$S \beta \rho_T \frac{dU_T}{d\tau} = P_T - F_{TP_T} - F_{II} \quad (4.33)$$

$$S(1 - \beta) \rho_T \frac{dW_T}{d\tau} = P_T - F_{TP_T} + F_{II} \quad (4.34)$$

Для подальшого перетворення виконуємо заміну:

$$\frac{dU_T}{d\tau} = \frac{dU_T}{dz} \cdot \frac{dz}{d\tau} = \frac{dU_T}{dz} U_T \quad (4.35)$$

$$\frac{dW_T}{d\tau} = \frac{dW_T}{dz} W_T \quad (4.36)$$

Підставивши значення (4.35) і (4.36) в рівняння (4.33) і (4.34) отримаємо:

$$S \beta \rho_T U_T \frac{dU_T}{dz} = P_T - F_{TP_T} - F_{II} \quad (4.37)$$

$$S(1 - \beta) \rho_T W_T \frac{dW_T}{dz} = P_T - F_{TP_T} + F_{II} \quad (4.38)$$

Сили, які входять в рівняння (4.37) і (4.38) виражаються рівняннями:

$$P_T = S\beta\rho_T g \quad (4.39)$$

$$P_T = S(1 - \beta)\rho_T g(1 - \Delta\rho) \quad (4.40)$$

$$F_{TP_T} = S\beta\rho_T g f_{TP} \cos \alpha \quad (4.41)$$

$$F_{TP_T} = \lambda_{TP} \frac{S}{D_{\text{э}}} \cdot \frac{\rho_T W_T^2}{2} \quad (4.42)$$

$$F_{II} = \zeta S\beta k \left(\frac{(W_T - U_T)^2 \rho_T}{2} \right) \quad (4.43)$$

де f_{TP} - коефіцієнт тертя частинок об стінки каналу;

g - прискорення вільного падіння, м/с²;

α - кут нахилу стінок каналу;

λ_{TP} - коефіцієнт тертя газового потоку об стінки каналу;

$D_{\text{э}}$ - еквівалентний діаметр каналу, м;

ζ - коефіцієнт аеродинамічного опору газового середовища;

k - відношення площі міделевого перетину частинки до її об'єму, м²/м³;

$\Delta\rho$ - відношення густин газу зовні і всередині каналу;

Оскільки температура повітря всередині каналу і ззовні апарату однакова, то масова сила діюча на газовий потік, урівноважується Архімедовою силою.

Тоді $\zeta = 1$ і відповідно $P_T = 0$.

Підставивши рівняння (4.39 – 4.43) в рівняння (4.37) і (4.38) отримаємо:

$$\beta\rho_T U_T \frac{dU_T}{dz} = \beta\rho_T g (1 - f_{TP} \cos \alpha) - \zeta\beta k \frac{(W_T - U_T)^2}{2} \rho_T \quad (4.44)$$

$$(1-\beta)\rho_{\Gamma}W_{\Gamma}\frac{dW_{\Gamma}}{dz} = -\frac{\lambda_{TP}}{D_{\text{э}}}\cdot\frac{\rho_{\Gamma}W_{\Gamma}^2}{2} + \zeta\beta k\frac{(W_{\Gamma}-U_{\Gamma})^2}{2}\rho_{\Gamma} \quad (4.45)$$

Зведемо ці рівняння у систему (4.46), яка описує двофазний потік:

$$\begin{cases} \beta\rho_{\Gamma}U_{\Gamma}\frac{dU_{\Gamma}}{dz} = \beta\rho_{\Gamma}g(1-f_{TP}\cos\alpha) - \zeta\beta k\frac{(W_{\Gamma}-U_{\Gamma})^2}{2}\rho_{\Gamma} \\ (1-\beta)\rho_{\Gamma}W_{\Gamma}\frac{dW_{\Gamma}}{dz} = -\frac{\lambda_{TP}}{D_{\text{э}}}\cdot\frac{\rho_{\Gamma}W_{\Gamma}^2}{2} + \zeta\beta k\frac{(W_{\Gamma}-U_{\Gamma})^2}{2}\rho_{\Gamma} \end{cases} \quad (4.46)$$

Виконаємо заміни у позначеннях $W_{\Gamma}=U_1; U_{\Gamma}=U_2; \cos\alpha = \frac{1}{\sqrt{1+\theta^2}}$.

Отримаємо диференціальні рівняння з урахуванням заміні:

$$\begin{cases} \frac{\partial U_2}{\partial z} = \frac{-g\left(1+\frac{f_{TP}}{\sqrt{1+\theta^2}}\right) - \zeta k\frac{(U_1-U_2)^2}{2}\cdot\frac{\rho_{\Gamma}}{\rho_{\Gamma}}}{U_2} \\ \frac{\partial U_1}{\partial z} = \frac{-\frac{\lambda_{TP}}{D_{\text{э}}}\cdot\frac{U_1}{2} + \zeta k\frac{(U_1-U_2)^2}{2}}{(1-\beta)U_1} \end{cases} \quad (4.47)$$

Беремо систему рівнянь (4.47), й інтегруємо методом Рунге-Кутта 4-го порядку для граничного значення швидкості $U_0 = 0$.

Відповідна вектор-функція перших похідних (градієнт):

$$D_z(z,U) = \begin{bmatrix} \frac{-g\left(1+\frac{f_{TP}}{\sqrt{1+\theta^2}}\right) - \zeta k\frac{(U_1-U_2)^2}{2}\cdot\frac{\rho_{\Gamma}}{\rho_{\Gamma}}}{U_2} \\ \frac{-\frac{\lambda_{TP}}{D_{\text{э}}}\cdot\frac{U_1}{2} + \zeta k\frac{(U_1-U_2)^2}{2}}{(1-\beta)U_1} \end{bmatrix} \quad (4.48)$$

Отримуємо залежність швидкості частинок (U_{Tz}) і повітряного потоку (W_{Tz}) (Додаток В) в умовах двофазного потоку у вертикальному напрямку по осі Z робочого простору (рисунок 4.12).

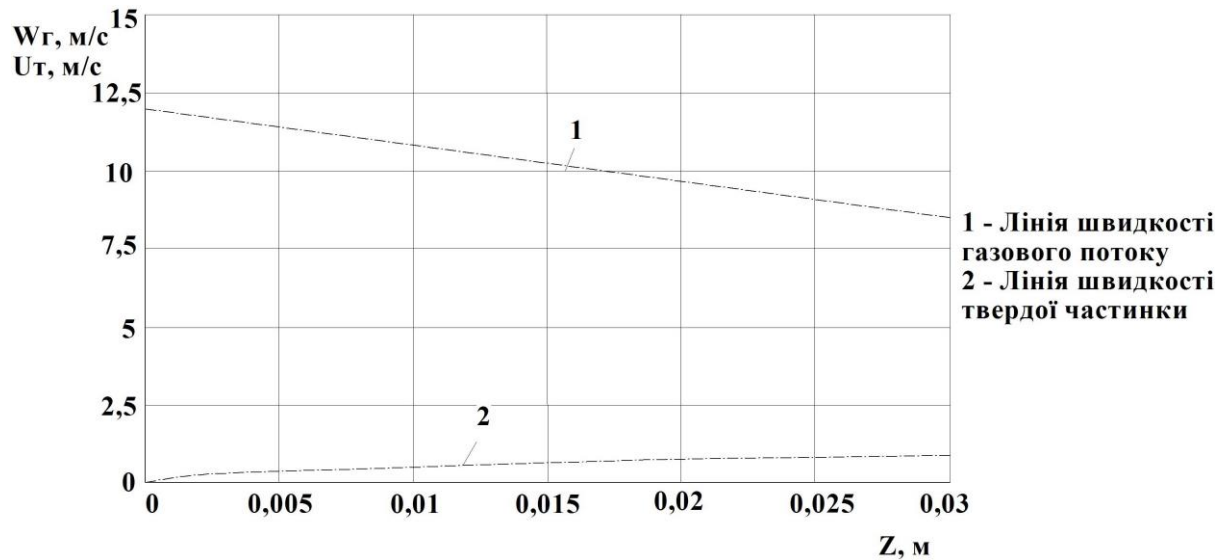


Рисунок 4.12 – Залежність швидкості частинок (U_{Tz}) і повітряного потоку (W_{Tz}) в умовах двофазного потоку у вертикальному напрямку по осі Z робочого простору апарату

Розглянемо горизонтальний рух матеріалу в газовому потоку в каналі, що розширюється (рисунок 4.13).

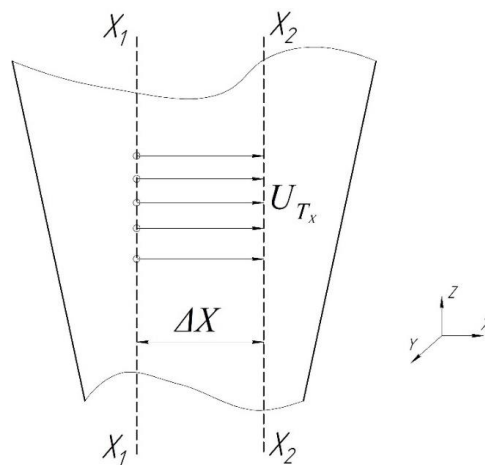


Рисунок 4.13 – Схема горизонтального руху матеріалу в каналі, що розширюється

Після зіткнення твердої частинки об стінку каналу, частинка відштовхується і рухається вздовж осі X , до протилежної стінки каналу. Відповідно кількість руху твердої і газової фази за час $\Delta\tau$ при їх русі із положення $X_1 - X_2$ в положення $X_1 - X_2$ дорівнює імпульсу діючих на них сил. При цьому відстань між перетинами буде відповідати ΔX :

$$\Delta(m_T U_T) = (F_{II} - F_{CT}) \Delta X \Delta \tau, \quad (4.49)$$

$$\Delta(m_G W_G) = (F_{II}) \Delta X \Delta \tau, \quad (4.50)$$

де U_{Tx} - швидкість твердої частинки по осі X згідно рівняння (4.23), м/с;

W_{Gx} - швидкість газового потоку по осі X згідно рівняння (4.20), м/с;

F_{CT} - сили удару частинки об стінки каналу, Н/м.

В рівняннях (4.49) і (4.50) згідно з вищевикладеними позначеннями, допущеннями і перетвореннями:

$$m_T = S \beta \rho_T \Delta X, \quad (4.51)$$

$$m_G = S(1 - \beta) \rho_G \Delta X, \quad (4.52)$$

Отримаємо:

$$S \beta \rho_T U_T \frac{dU_T}{dX} = F_{II} - F_{CT}, \quad (4.53)$$

$$S(1 - \beta) \rho_G W_G \frac{dW_G}{dX} = F_{II}, \quad (4.54)$$

Сила удару частинок об стінки каналу рівна [110]:

$$F_{CT} = f_{TP} (1 + k_n) m_T \frac{U_T}{\Delta \tau_K} = f_{TP} (1 + k_n) S \beta \rho_T \frac{U_T}{\tau_K}, \quad (4.55)$$

де k_n - коефіцієнт відновлення нормальної складової швидкості після зіткнення частинок о стінки каналу;

τ_K - тривалість контакту зіткнення, с.

Частинки при русі зіштовхуються з нерухомою стінкою, тому в середині частинок не виникає остаточних деформацій і удар слід вважати пружним. Тому згідно [125] $k_n = 1$.

Тоді рівняння (4.53) і (4.54) запишеться у вигляді:

$$\beta \rho_T \frac{dU_T}{dX} = \zeta \beta k \frac{(W_\Gamma - U_T)^2}{2} \rho_\Gamma - 2 f_{TP} \beta \rho_T \frac{U_T}{\tau_K}, \quad (4.56)$$

$$(1 - \beta) \rho_\Gamma W_\Gamma \frac{dW_\Gamma}{dX} = \zeta \beta k \frac{(W_\Gamma - U_T)^2}{2} \rho_\Gamma, \quad (4.57)$$

Рівняння (4.56) та (4.57) зводимо у систему:

$$\begin{cases} \beta \rho_T \frac{dU_T}{dX} = \zeta \beta k \frac{(W_\Gamma - U_T)^2}{2} \rho_\Gamma - 2 f_{TP} \beta \rho_T \frac{U_T}{\tau_K}, \\ (1 - \beta) \rho_\Gamma W_\Gamma \frac{dW_\Gamma}{dX} = -\zeta \beta k \frac{(W_\Gamma - U_T)^2}{2} \rho_\Gamma \end{cases}, \quad (4.58)$$

Беремо систему рівнянь (4.58), й інтегруємо методом Рунге-Кутта 4-го порядку для граничного значення швидкості $U_0 = 0$ і отримуємо систему рівнянь для визначення швидкості частинок і повітряного потоку в горизонтальному напрямку по осі X. Вектор-функція перших похідних (градієнт):

$$D_x(x, U) = \begin{bmatrix} \frac{\zeta k \frac{(U_1 - U_2)^2}{2} \cdot \frac{\rho_G}{\rho_T} - 2 f_{TP} \beta \rho_T \frac{U_T}{\tau_K}}{U_2} \\ \frac{-\zeta k \frac{(U_1 - U_2)^2}{2}}{(1 - \beta) U_1} \end{bmatrix}, \quad (4.59)$$

Процедура реалізації алгоритму розрахунку наведена в додатку Б.

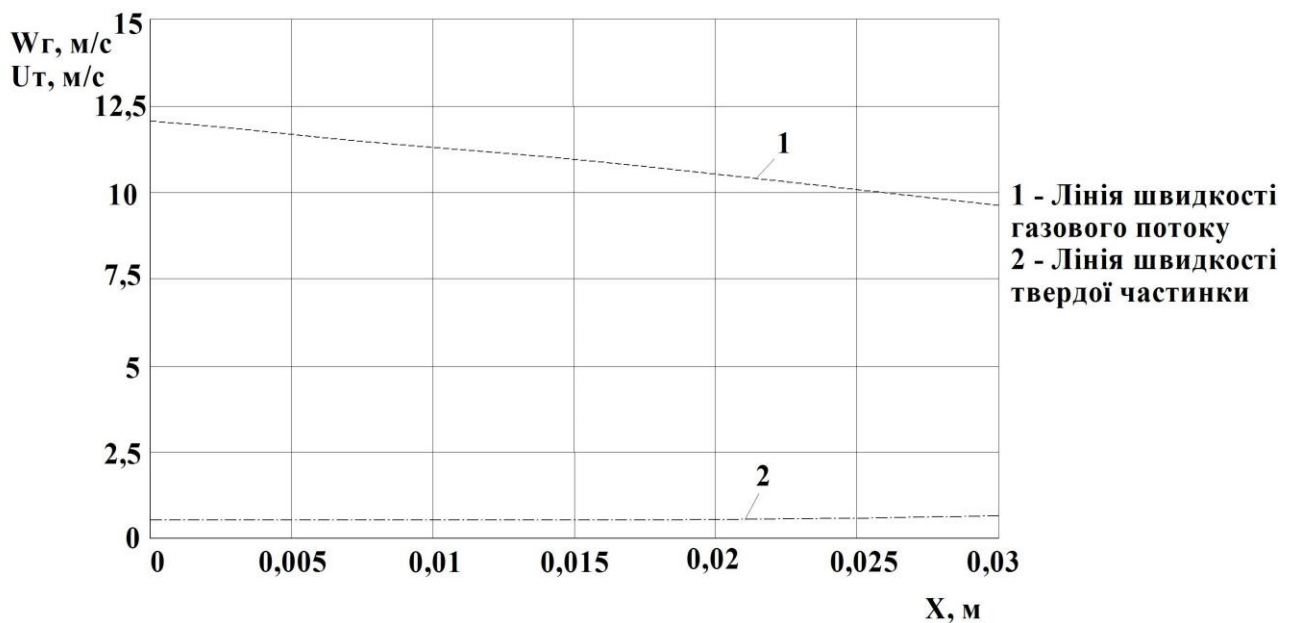


Рисунок 4.14 – Залежність швидкості частинки (U_{T_x}) і газового потоку (W_{G_x}) в умовах двофазного потоку у горизонтальному напрямку по осі X робочого простору апарату

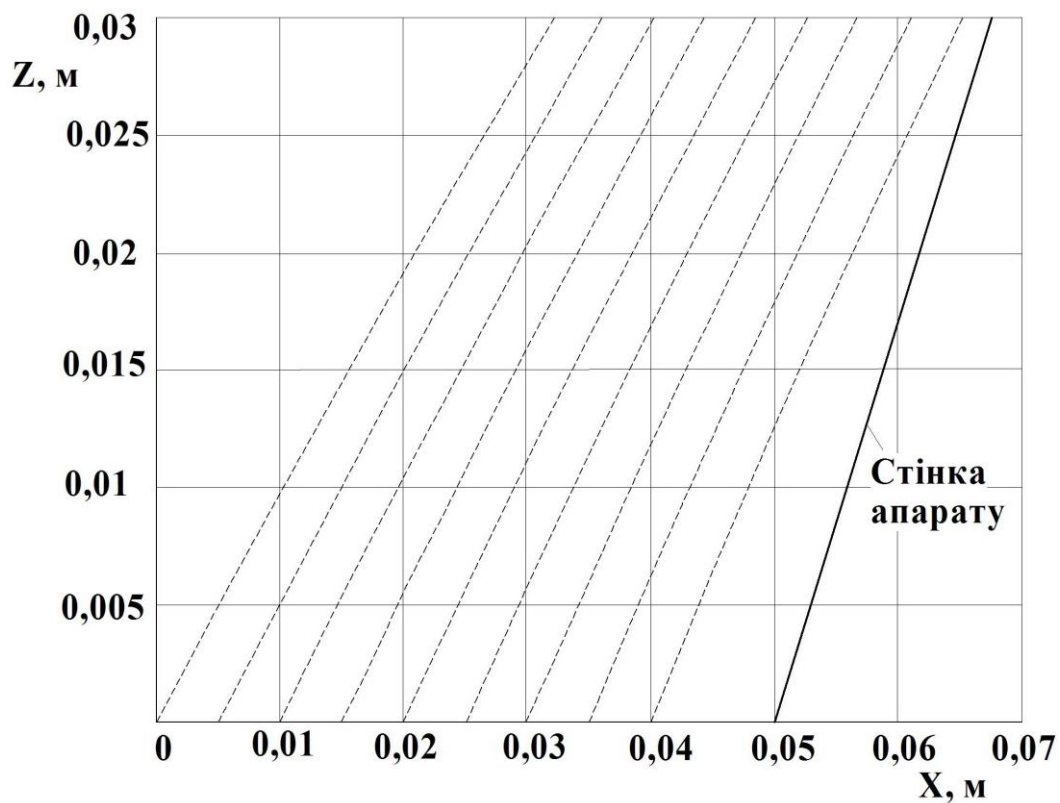


Рисунок 4.15 – Лінії току газового потоку в навантаженому апараті

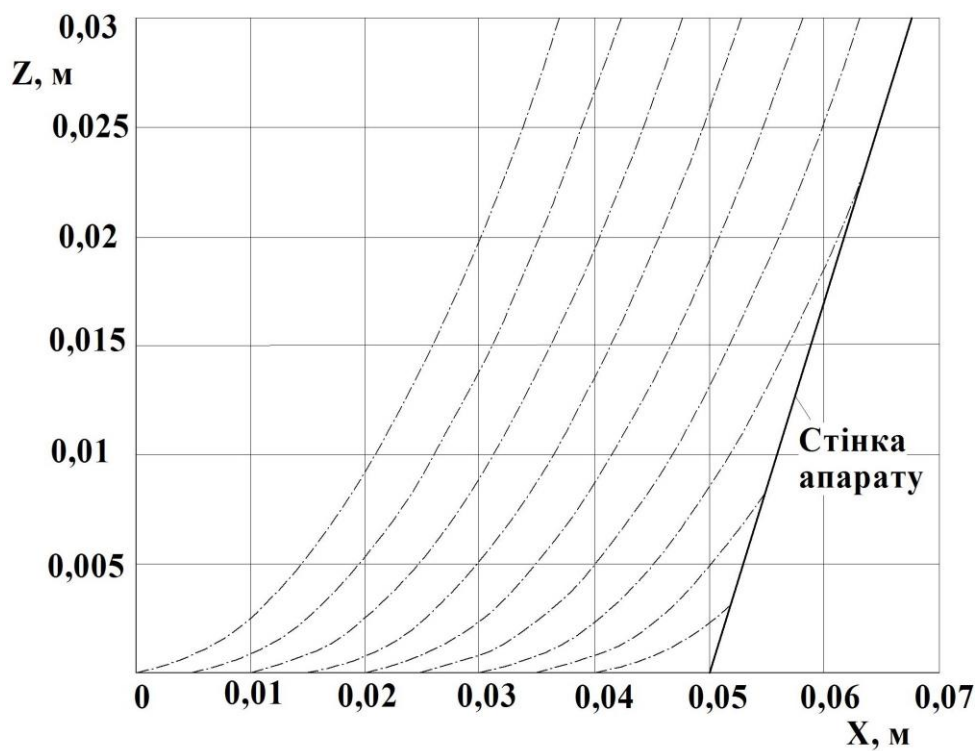


Рисунок 4.16 – Траєкторії руху твердих частинок в навантаженому апараті

Отримані рішення рівнянь (4.47 – 4.48; 4.58 – 4.59) 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 частинку сил тертя, стисненості потоку та сил співударяння між частинками значно впливає на швидкість частинок в потоці, і вона знижується (рисунок 4.12, рисунок 4.14, лінія 2). Швидкість газового потоку також знижується (рисунок 4.12, рисунок 4.14, лінія 1), бо створюється додатковий гідравлічний опір в виді скупчення матеріалу у агломерати. Оцінюючи траєкторії руху частинок (рисунок 4.16) та газового потоку (рисунок 4.15), ми бачимо що траєкторія польоту частинок вирівнюється, і газовий потік вже не так явно піджимає частинки до стінок.

4.4 Закономірності процесу пневмокласифікації

Виділимо в зваженому шарі матеріалу в апараті елементарний об'єм ΔV (рисунок 4.17).

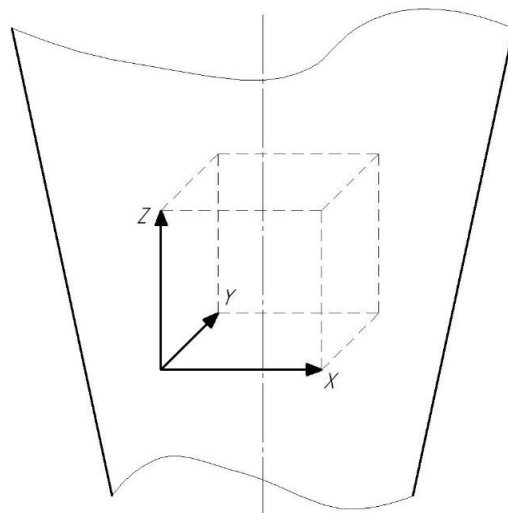


Рисунок 4.17 – Схема, елементарного об'єму в апараті

Розглянемо зміну концентрації частинок дрібної фракції (C_M) в виділеному об'ємі у часі та просторі.

Рівняння, яке характеризує дану зміну, виражається у вигляді:

$$G_{cl} \frac{\partial C_M(\tau)}{\partial \tau} = G_{cl} (U_T \text{grad} C_M) + G_{cl} K_y (C_M^* - C_M(\tau)) = \\ = \left(U_{T_x} \frac{\partial C_M}{\partial X} + U_{T_y} \frac{\partial C_M}{\partial Y} + U_{T_z} \frac{\partial C_M}{\partial Z} \right) + G_{cl} K_y (C_M^* - C_M(\tau)) \quad (4.60)$$

де G_{cl} - маса частинок в зваженому шарі, кг;

$U_{T_x}, U_{T_y}, U_{T_z}$ - швидкість твердих частинок відповідно до вісей X, Y, Z, м/с;

$C_M(\tau)$ - 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.

Зважаючи на те, що ширина пневмокласифікатора значно менше довжини перетину, вважаємо, що по осі Y зміни концентрації частинок дрібної фракції не відбувається, тобто в рівнянні (4.60):

$$U_{T_y} \frac{\partial C_M}{\partial Y} = 0$$

Також, зважаючи на те, що швидкість твердих частинок в горизонтальній проекції X в напрямленні від осі апарату до стінок, значно зменшується за рахунок впливу гальмівного ефекту і з цієї ж причини газовий потік в

горизонтальному напрямі не буде суттєво впливати на розшарування частинок по розмірам.

Тоді в рівнянні (4.60):

$$U_{Tx} \frac{\partial C_M}{\partial X} = 0$$

Після вказаних припущень, рівняння (4.60) запишеться у вигляді:

$$G_{cl} \frac{\partial C_M(\tau)}{\partial \tau} = G_{cl} U_{Tz} \frac{\partial C_M}{\partial Z} + G_{cl} K_y (C_M^* - C_M(\tau)), \quad (4.61)$$

Рівняння (4.61) характеризує кінетичний винос, обумовлений виносом із шару дрібних частинок, швидкість витання яких менша від швидкості газового потоку, так і динамічний (інерційний), обумовлений кінетичною енергією дрібних частинок, які виносяться з поверхні зваженого шару.

Представимо рівняння (4.61) у вигляді:

$$\frac{\partial C_M(Z, \tau)}{\partial \tau} + U_{Tz} \frac{\partial C_M(Z, \tau)}{\partial Z} - K_y [C_M^* - C_M(Z, \tau)] = 0, \quad (4.62)$$

Зробивши пряме перетворення Лапласа, отримаємо:

$$L[C_M(Z, \tau)] = C_M(Z, s), \quad (4.63)$$

$$L\left[\frac{\partial C_M(Z, \tau)}{\partial \tau}\right] = s \cdot C_M(Z, s) - C_0(Z), \quad (4.64)$$

$$L(C_M^*) = \frac{C^*}{s}, \quad (4.65)$$

Отримаємо:

$$s \cdot C_M(Z, s) - C_0(Z) + U_{T_z} \frac{\partial C_M(Z, s)}{\partial Z} - K_y \left[\frac{C_M^*}{s} - (Z, \tau) \right] = 0, \quad (4.66)$$

$$U_{T_z}(Z) C_M^* + (s - k) C_M - C_0(Z) = \frac{k C_M^*}{s}, \quad (4.67)$$

Вважаємо, що середня швидкість частинок по висоті постійна, а також постійна початкова концентрація частинок по висоті:

$$\begin{cases} U_{T_z}(Z) = const \\ C_0(Z) = const \end{cases} \quad (4.68)$$

Загальний розв'язок неоднорідного рівняння буде мати вигляд:

$$C_M = \frac{C_0 + \frac{k C_M^*}{s}}{s + k} + A e^{\frac{-s+k}{U_T} Z}, \quad (4.69)$$

Задавши граничні умови $C_M(0, \tau) = C_{\text{ex}} = const$ та $L[C_M(0, \tau)] = \frac{C_{\text{ex}}}{s}$,

отримаємо:

$$C_M(0) = \frac{C_0 + \frac{k C_M^*}{s}}{s + k} + A = \frac{C_{\text{ex}}}{s}, \quad (4.70)$$

$$A = \frac{C_{\text{ex}}}{s} - \frac{C_0 + \frac{k C_M^*}{s}}{s + k}, \quad (4.71)$$

Звідки отримаємо загальне рівняння для визначення концентрації матеріалу в апараті:

$$C_M = \frac{C_{ex}}{s} e^{\frac{-s+k}{U_T} Z} + \frac{C_0 + \frac{kC_M^*}{s}}{s+k} \left(1 - e^{\frac{-s+k}{U_T} Z} \right), \quad (4.72)$$

Зробимо зворотне перетворення Лапласа:

$$L^{-1} \left(\frac{C_{ex}}{s} e^{\frac{-s+k}{U_T} Z} \right) = C_M^* e^{\frac{kZ}{U_T}} H \left(\tau - \frac{Z}{U_T} \right), \quad (4.73)$$

де H - функція Хевісайда.

$$\frac{C_0 + \frac{kC_M^*}{s}}{s+k} = \frac{C_M^*}{s} + \frac{C_0 - C_M^*}{s+k}, \quad (4.74)$$

$$L^{-1} \left(\frac{C_M^*}{s} \right) = C_M^*, \quad (4.75)$$

$$L^{-1} \left(\frac{C_0 - C_M^*}{s+k} \right) = (C_0 - C_M^*) e^{-k\tau}, \quad (4.76)$$

$$L^{-1} \left(\frac{C_M^*}{s} e^{\frac{-s+k}{U_T} Z} \right) = C_M^* e^{\frac{-kZ}{U_T}} H \left(\tau - \frac{Z}{U_T} \right), \quad (4.77)$$

$$L^{-1} \left(\frac{C_0 - C_M^*}{s+k} e^{\frac{-s+k}{U_T} Z} \right) = (C_0 - C_M^*) e^{-k\tau} H \left(\tau - \frac{Z}{U_T} \right), \quad (4.78)$$

З урахуванням перетворень (4.73) – (4.78), рівняння для розв'язання нестационарної задачі визначення концентрації частинок по висоті апарату Z з часом τ має наступний вигляд:

$$C_M(Z, \tau) = C_{\text{ex}} e^{\frac{-kZ}{U_T}} H\left(\tau - \frac{Z}{U_T}\right) + C_M^* + (C_0 - C_M^*) e^{-k\tau} - C_M^* e^{\frac{-kZ}{U_T}} \times \\ \times H\left(\tau - \frac{Z}{U_T}\right) - (C_0 - C_M^*) e^{-k\tau} H\left(\tau - \frac{Z}{U_T}\right) = C_M^* + (C_{\text{ex}} - C_M^*) e^{\frac{-kZ}{U_T}} \times, \quad (4.79) \\ \times H\left(\tau - \frac{Z}{U_T}\right) + (C_0 - C_M^*) e^{-k\tau} \left[1 - H\left(\tau - \frac{Z}{U_T}\right)\right]$$

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

$$C_M(Z, \tau) = C_M^* + (C_0 - C_M^*) \left\{ e^{\frac{-kZ}{U_T}} H\left(\tau - \frac{Z}{U_T}\right) + e^{-k\tau} \left[1 - H\left(\tau - \frac{Z}{U_T}\right)\right] \right\}, \quad (4.80)$$

Використовуючи формулу (4.80) будуємо графік зміни концентрації дрібних частинок у зваженому шарі по висоті апарату Z з часом τ (рисунок 4.18):

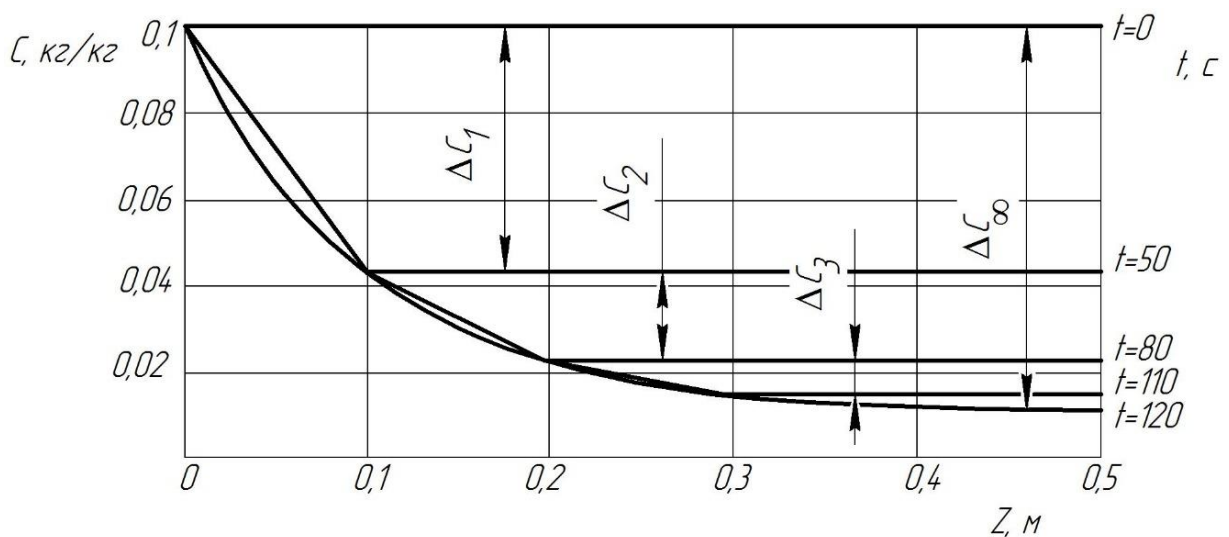


Рисунок 4.18 – Залежність зміни концентрації дрібних частинок у зваженому шарі по висоті апарату Z з часом τ

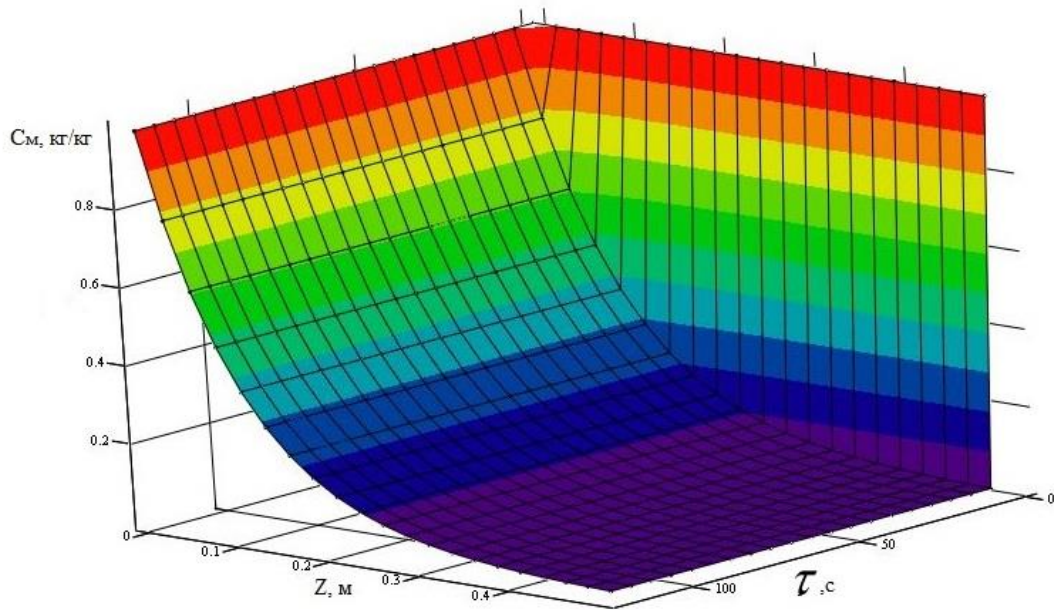


Рисунок 4.19 – Залежність зміни концентрації дрібних частинок у зваженому шарі по висоті апарату Z з часом τ

З даних графіка витікає, що з часом концентрація 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 обертаючому шарі матеріалу, бо створені агломерати дрібної фракції затримують частинки крупної фракції. З проміжком часу крупні частинки, які затримались в шарі, поступово випадають з нього також.

Висновки до четвертого розділу

1. Розроблена математична модель гідродинаміки однофазного газового потоку, яка дозволяє визначити швидкість газового потоку в різних перетинах апарату по вертикальній та горизонтальній осі, а також отримати епюри траєкторій газового потоку в робочому об'ємі пневмокласифікатора.

2. Розроблена математична модель гідродинаміки руху одиночної частинки в газовому потоці, яка дозволяє отримати залежність зміни швидкості одиночної частинки по висоті і ширині робочого об'єму апарату під дією газового потоку. Також отримані траєкторії руху твердої частинки в робочому об'ємі пневмокласифікатора.

3. Розроблена математична модель гідродинаміки двохфазного потоку, яка дозволяє отримати залежність зміни швидкості шару частинок по висоті і ширині робочого об'єму апарату під дією газового потоку. Також отримані траєкторії руху твердих частинок і газового потоку в робочому об'ємі пневмокласифікатора в робочих умовах.

4. Розроблена математична модель для оцінки зміни концентрації дрібних частинок в робочому об'ємі апарату в залежності від часу.

Основні результати опубліковано в роботі [155].

РОЗДІЛ 5

УЗАГАЛЬНЕННЯ ТА ВИКОРИСТАННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕНЬ РОМБІЧНОГО ПНЕВМОКЛАСИФІКАТОРА

Після перевірки роботоспособності моделі пневмокласифікатора та розробленої математичної моделі гідродинаміки руху однофазного і двофазного потоків в робочому об'ємі, на основі отриманих даних розробляється методика інженерного розрахунку пневмокласифікатора змінного перетину. Розроблена методика дає змогу спроектувати промисловий варіант установки та перевірити її роботоспособність в умовах діючого підприємства.

5.1 Аналіз та співставлення результатів експериментальних досліджень та математичного моделювання

5.1.1 Співставлення результатів гідродинаміки однофазного потоку

Для перевірки коректності отриманих результатів експериментальних досліджень та математичного моделювання, їх необхідно співставити між собою. Виходячи із складності отримання експериментальних даних замірів швидкості окремої частинки в апараті, а також суміші частинок, провести співставлення можливо по однофазному газовому потоку та по ефективності вилучення дрібної фракції із завислого шару матеріалу.

На залежності (рисунок 5.1) представлено порівняння експериментальної та розрахункової швидкості газового потоку по вертикальній осі Z робочого об'єму апарату. Із залежності витікає, що математична модель підтверджує отримані в ході експерименту дані, і похибка не перевищує 2%.

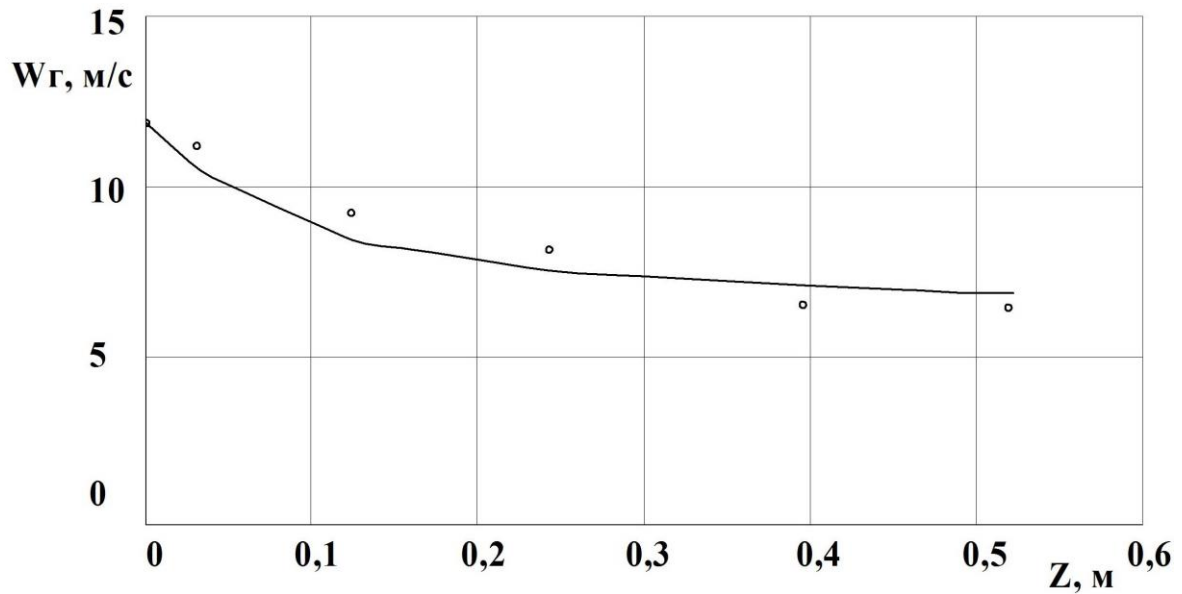


Рисунок 5.1 – Порівняння теоретичних (лінія) та експериментальних (точки) значень зміни швидкості газового потоку по висоті робочого простору апарату

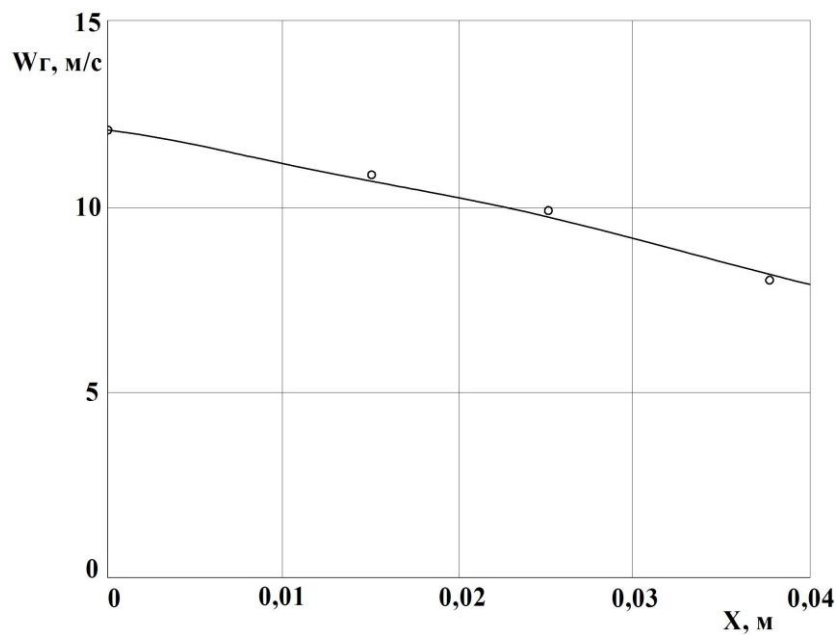


Рисунок 5.2– Порівняння теоретичних (лінія) та експериментальних (точки) значень зміни швидкості газового потоку по ширині робочого простору апарату

На залежності (рисунок 5.2) представлено порівняння експериментальної та розрахункової швидкості газового потоку по горизонтальній осі X робочого

об'єму апарату. Із залежності витікає, що математична модель підтверджує отримані в ході експерименту данні, і похибка не перевищує 2%.

Похибка зіставлення результатів теоретичних та експериментальних величин параметрів в межах 2% підтверджується розрахунками за допомогою програмного комплексу Mathcad (Додаток В).

5.1.2 Співставлення результатів ефективності розділення

Для співставлення результатів якості розділення отриманих в математичній моделі і експерименті, будується загальний графік зміни концентрації дрібних частинок у зваженому шарі з часом τ . Ці данні дають можливість провести порівняння експериментальних і теоретичних даних отриманих з математичної моделі.

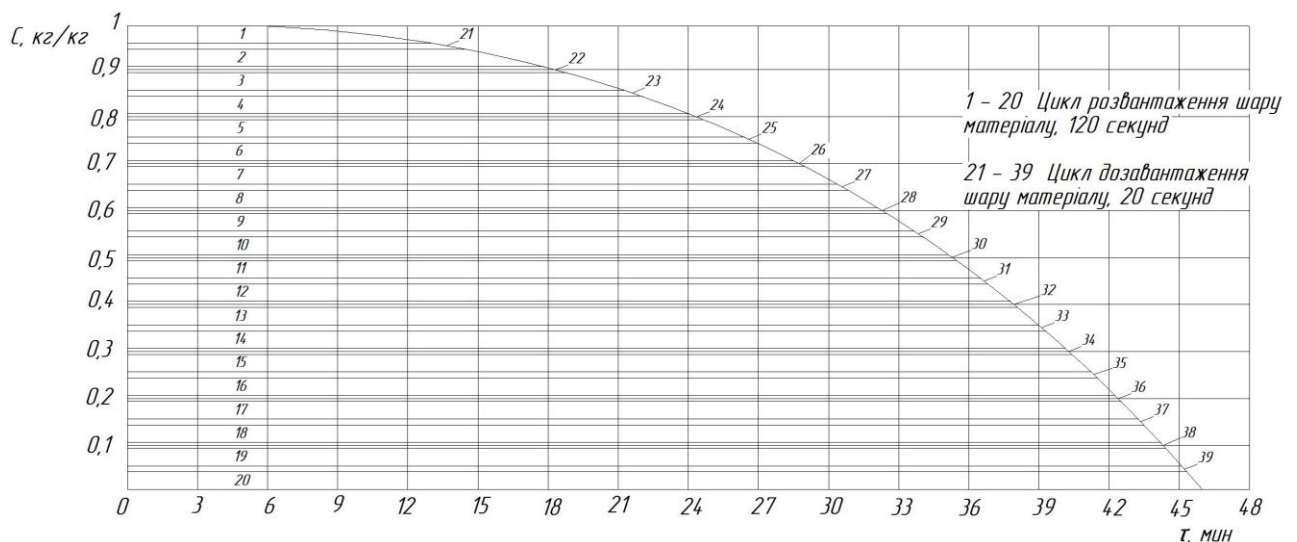


Рисунок 5.3 – Залежність зміни концентрації дрібних частинок у зваженому шарі з часом τ

Залежність (рисунок 5.3) 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, і за цей час в шар поступає близько 50 - 60 г матеріалу. Цикли чергуються між собою до повного розділення завантаженого матеріалу. Загальний час становить в середньому за 39 циклів - 46 хвилин.

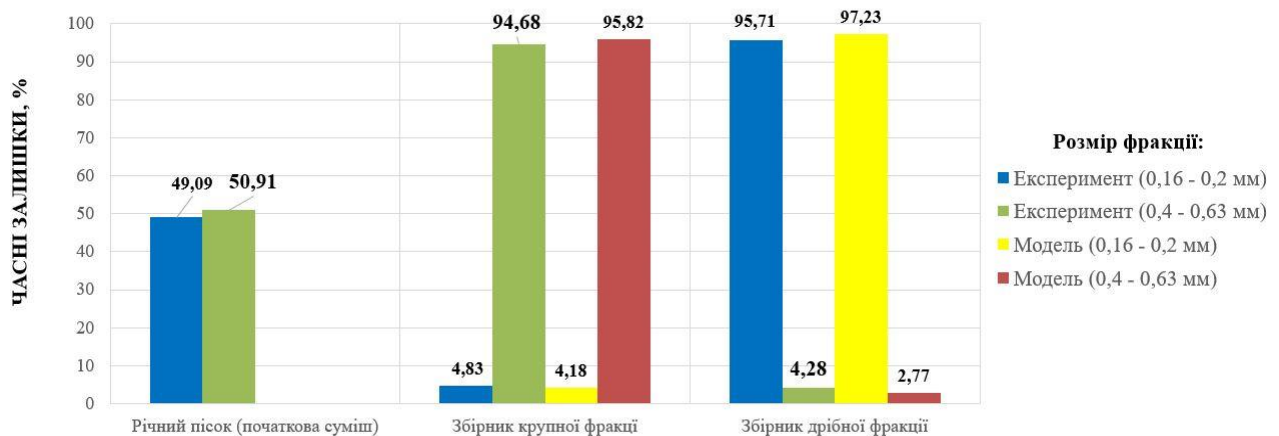


Рисунок 5.4– Оцінка якості пневмокласифікації річного піску, в порівнянні експерименту та математичної моделі

Порівнюючи данні отримані з гістограми (рисунок 5.4) по класифікації річного піску, можна зробити висновок, що математична модель пневмокласифікації дозволяє оцінити якість розділення 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%.

5.2 Методика розрахунку пневмокласифікатора

На першому етапі потрібно вибрати обладнання для створення газового потоку з промислових каталогів, або обладнання яке доступне в межах підприємства і планується використовуватись для класифікації сипкого матеріалу. Кожне обладнання для створення газового потоку характеризується параметром витрати об'єму газу за одиницю часу. На основі цього параметру і буде перевірятись можливість та якість класифікації.

Першим кроком витрата газового потоку переводиться в швидкість, для отримання початкової швидкості на вході в апарат:

$$w_0 = \frac{Q}{S}, \quad (5.1)$$

де Q - об'ємна витрата газового потоку, м³/с;

S - площа поперечного перерізу потоку, м².

Далі визначається швидкість газового потоку по висоті апарату:

$$W_{\Gamma_{Z_1}} = w_0 \cdot \left[\frac{d_k}{d_0} \right]^{-\frac{C}{2\theta}}, \quad (5.2)$$

де d_0 – початковий перетин апарату, м;

d_k – перетин апарату в точці, де потрібно визначити швидкість потоку, м;

θ – кут розкриття ромбу, град;

w_0 – швидкість на вході в апарат, м/с;

C – коефіцієнт який залежить від числа Рейнольдса.

Нахил стінки проточної частини:

$$\theta = \frac{D_1^{\max} - d_0^n}{H_1} = \operatorname{tg} \alpha, \quad (5.3)$$

де D_1^{\max} - максимальна ширина перетину каналу, м;

H_1 - висота каналу, м;

α - кут нахилу стінки апарату, град. Рекомендується використовувати кути розкриття $\alpha_1 = 8^\circ - 9^\circ$ і закриття $\alpha_2 = 10^\circ - 11^\circ$.

Для вирішення рівняння (5.2) розраховується коефіцієнт C , при умові, що $W_{\Gamma_{Z_0}} < w_0$ і $\left| W_{\Gamma_{Z_0}} - W_{\Gamma_{Z_1}} \right| \leq \varepsilon$, де ε - абсолютна похибка вимірювання, $\varepsilon \leq 0.5$.

Значення коефіцієнта C визначається:

$$C = 2\theta \cdot \frac{\ln\left(\frac{d_0}{d_k}\right) \ln\left(\frac{W_{\Gamma_{Z_0}}}{w_0}\right)}{\ln\left(\frac{d_0}{d_k}\right)^2}, \quad (5.4)$$

Зміна швидкості газового потоку по ширині апарату розраховується з рівняння:

$$W_{\Gamma_{X_1}} = W_{\Gamma_{Z_1}} \left(1 - \frac{X}{B}\right)^{\frac{1}{n}}, \quad (5.5)$$

де X - координати точки по перетину каналу, в якій проводять розрахунки значення швидкості газового потоку W_{Γ_X} по осі X , м;

n – коефіцієнт який залежить від числа Рейнольдса.

B - довжина перетину каналу, м.

Для вирішення рівняння (5.5) розраховується коефіцієнт n , при умові, що $W_{\Gamma_{x_1}} < W_{\Gamma_{z_1}}$ і $|W_{\Gamma_{x_0}} - W_{\Gamma_{x_1}}| \leq \varepsilon$, де ε - абсолютна похибка вимірювання, $\varepsilon \leq 0,5$.

Значення коефіцієнта n :

$$n = \frac{\ln\left(1 - \frac{x_m}{B}\right) \ln\left(\frac{W_{\Gamma_{x_0}}}{w_0}\right)}{\ln\left(\frac{w_{x_m}}{w_0}\right)^2}, \quad (5.6)$$

Швидкість твердої частинки визначається шляхом чисельного інтегрування:

$$\begin{cases} U_{T_z} \frac{dU_{T_z}}{dZ} = -g + \frac{3}{4} \zeta \frac{\rho_{\Gamma} (W_{\Gamma_{z_1}} - U_{T_z})^2}{\rho_T d_T} \\ U_{T_x} \frac{dU_{T_x}}{dX} = \frac{3}{4} \zeta \frac{\rho_{\Gamma} (W_{\Gamma_{x_1}} - U_{T_x})^2}{\rho_T d_T} \end{cases}, \quad (5.7)$$

де U_T - швидкість твердої частинки, м/с;

ζ - коефіцієнт гідродинамічного опору, $\zeta = f(\text{Re}_T)$;

ρ_{Γ} - густина газової фази, кг/м³;

ρ_T - густина твердої фази, кг/м³;

d_T - діаметр твердої частинки, м;

g - прискорення вільного падіння, м/с².

Система рівнянь для визначення швидкості частинок і повітряного потоку в вертикальному напрямку по осі Z двофазного потоку:

$$\left\{ \begin{array}{l} \beta \rho_T U_{T_z} \frac{dU_{T_z}}{dz} = \beta \rho_T g (1 - f_{TP} \cos \alpha) - \zeta \beta k \frac{(W_{T_z} - U_{T_z})^2}{2} \rho_T \\ (1 - \beta) \rho_T W_{T_z} \frac{dW_{T_z}}{dz} = -\frac{\lambda_{TP}}{D_{\text{э}}} \cdot \frac{\rho_T W_{T_z}^2}{2} + \zeta \beta k \frac{(W_{T_z} - U_{T_z})^2}{2} \rho_T \end{array} \right. , \quad (5.8)$$

де f_{TP} - коефіцієнт тертя частить об стінки каналу;

α - кут нахилу стінок каналу;

λ_{TP} - коефіцієнт тертя газового потоку об стінки каналу;

$D_{\text{э}}$ - еквівалентний діаметр каналу, м;

ζ - коефіцієнт аеродинамічного опору газового середовища;

k - відношення площі міделевого перетину частинки до її об'єму, $\text{м}^2/\text{м}^3$.

β - об'ємна концентрація твердої фази $\text{м}^3/\text{м}^3$.

Система рівнянь для визначення швидкості частинок і повітряного потоку в горизонтальному напрямку по осі X двофазного потоку:

$$\left\{ \begin{array}{l} \beta \rho_T \frac{dU_{T_x}}{dX} = \zeta \beta k \frac{(W_{T_x} - U_{T_x})^2}{2} \rho_T - 2 f_{TP} \beta \rho_T \frac{U_{T_x}}{\tau_K} \\ (1 - \beta) \rho_T W_{T_x} \frac{dW_{T_x}}{dX} = -\zeta \beta k \frac{(W_{T_x} - U_{T_x})^2}{2} \rho_T \end{array} \right. , \quad (5.9)$$

де τ_K - тривалість контакту зіткнення, с.

Визначення граничної концентрації частинок дрібної фракції з часом τ :

$$C_M^* = \frac{C_M - C_0 \left\{ e^{\frac{-kZ}{U_T}} H \left(\tau - \frac{Z}{U_{T_z}} \right) + e^{-k\tau} \left[1 - H \left(\tau - \frac{Z}{U_{T_z}} \right) \right] \right\}}{1 - \left\{ e^{\frac{-kZ}{U_T}} H \left(\tau - \frac{Z}{U_{T_z}} \right) + e^{-k\tau} \left[1 - H \left(\tau - \frac{Z}{U_{T_z}} \right) \right] \right\}} , \quad (5.10)$$

де τ - час повного циклу, с;

C_M - концентрація частинок дрібної фракції в провалі, $C_M \leq 5\%$, кг/кг;

C_0 - початкова концентрація частинок дрібної фракції в матеріалі, кг/кг.

Блок схема розрахунку представлена у додатку Г.

5.3 Порівняння основних типів пневмокласифікаторів

Різні типи пневмокласифікаторів можна порівняти на основі двох основних показників: граничному розміру розділення та показнику ефективності вилучення дрібної фракції у винос, при умові ідеальної класифікації з ефективністю розділення рівній одиниці (таблиця 5.1).

Таблиця 5.1 – Показники основних типів пневмокласифікаторів

№ п.п	Тип пневмокласифікатора	Граничний розмір розділення d_{zp} , мм	Ефективність вилучення ε_m , частки	Гідравлічний 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

Інерційні пневмокласифікатори, в яких сипкий матеріал подається струменем із живильника, барабаними розкидачами, стрічковими живильниками і т. д., можуть забезпечити розділення полідисперсних матеріалів на фракції заданого складу тільки до 38-42%. Така чистота розділення дуже низька в нинішніх умовах, тому ці апарати не знайшли широкого застосування в промисловості.

Пневмокласифікатори, які працюють за рахунок відцентрових сил, застосовують в основному для розділення на фракції високодисперсних матеріалів, з розміром частинок не більше 50 - 100 мкм. Данні апарати не забезпечують отримання однорідних високодисперсних продуктів. Їх максимальна ефективність не перевищує 60%. Загальний недолік таких апаратів – велика забрудненість крупної фракції дрібною. Вміст дрібних частинок в крупній фракції досягає 20 - 80%.

Невисока однорідність фракції отримується і при розділенні в каскаді циклонів різного діаметру, розділення в яких проходить послідовно. Тому цей спосіб доволі рідко застосовують для класифікації зернистих матеріалів. Також низьку ефективність поділу мають шахтні пневмокласифікатори (не більше 20-25%) і киплячого шару (не більше 30-40%).

Зернисті матеріали, що складаються з частинок розміром від 50 - 100 мкм до декількох міліметрів, більш економічно знепилувати і розділяти на фракції під дією гравітаційних і інерційних сил в висхідному потоці газу в пневмокласифікаторах, що представляють собою вертикальні канали з різними контактними елементами (полицями). Ефективність поділу поличних пневмокласифікаторов досить висока і досягає 80-85%. Перевагою апаратів з похилими перфорованими полицями є знепилення і класифікація сипких матеріалів широкого фракційного складу ($d_{гр} = 0,06 - 7$ мм).

В «ромбічному» пневмокласифікаторі змінного перетину завдяки активному аеродинамічному режиму та мінімальному гідравлічному опору досягається більш ефективний процес знепилення і класифікації сипучих зернистих матеріалів. Показники ефективності розділення та чистоти фракції

значно 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, від всіх інших представлених пневмокласифікаторів. Для підвищення продуктивності можна використати каскад апаратів, апарати в якому будуть встановлені послідовно.

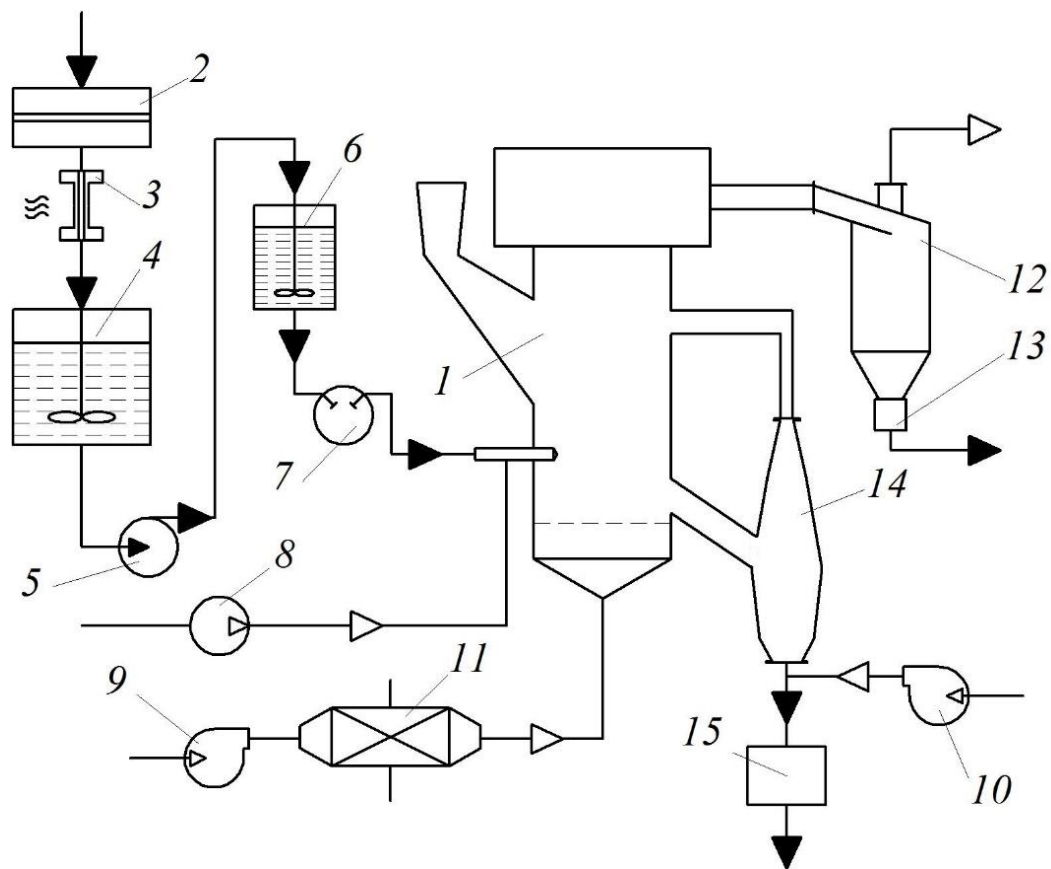
5.4 Використання пневмокласифікатора у промисловості

У рамках держбюджетної тематики «Розробка та дослідження високоефективних апаратів для процесів масообміну, кристалізації та класифікації» (номер державної реєстрації 0110U001953) були проведені дослідження високоефективних апаратів для пневмокласифікації. Отримані данні дали змогу порівняти гідродинаміку та ефективність розділення в поличному пневмокласифікаторі, з різними типами і формами перфорованих поличок, та «ромбічному» пневмокласифікаторі.

Оцінивши результати, було вирішено використати «ромбічний» пневмокласифікатор в установці для покриття гранул мінеральних добрив органічною суспензією (рисунок 5.5). Отриманий графік розсіву карбаміду від пилу (рисунок 5.6)

Установка працює наступним чином. Вихідна суспензія проходить стадію подрібнення - курячий послід потрапляє в робочу зону дискового млину 2, де відбувається руйнування твердих дисперсних включень. Отримана гомогенна маса направляється в кавітатор 3. В ємність 4 надходить повністю підготована для роботи сировина. За допомогою насоса 5, курячий послід потрапляє в мірний бачок 6, який оснащений перемішуючим пристроєм.

Процес гранулювання відбувається в робочій камері апарату 1. Під газорозподільну решітку, проходячи через калорифер 11, подається потік гарячого повітря в кількості, що забезпечує стійкий киплячий шар гранул. На пневматичну форсунку насосом 7 дозовано подається підготовлена органічна маса, розпил якої здійснюється стисненим повітрям, що генерується компресором 8. Очищення відпрацьованого повітря від пилу відбувається в циклоні 12, пил накопичується в збірнику 13, а очищене повітря виводиться за межі установки.



1 – апарат киплячого шару; 2 – дисковий млин; 3 – кавітатор; 4 – ємність робочої речовини; 5 – насос; 6 – мірний бачок; 7 – насос-дозатор; 8 – компресор; 9, 10 – газодувка; 11 – калорифер; 12 – циклон; 13 – збірник пилу; 14 – «Ромбічний» пневмокласифікатор; 15 – збірник гранул.

Рисунок 5.5 – Структурна схема блоку покриття гранул мінеральних добрив суспензією курячого посліду.

З рівня решітки організований постійний відвід гранул. Відібрані гранули потрапляють в «ромбічний» пневмокласифікатор 14, в якому за допомогою газодувки 10 відбувається процес пневмокласифікації: дрібні гранули (розміром менше 2 мм) по трубопроводу повертаються в киплячий шар на дорощування, а гранули товарного розміру - виводяться з процесу і накопичуються в збірнику 15.

Також в рамках виконання робіт по договору №51.18-02.15.СП за темою «Сучасні технології та обладнання для сепарації і класифікації дисперсних сумішей рослинної сировини» проведені експерименти з матеріалами підприємства ТОВ «Фітофармація», та видані рекомендації вдосконалення існуючого виробництва лікарської рослинної продукції, спецій та натуральних інгредієнтів у вигляді технічних пропозицій та практичних рекомендацій щодо запровадження «ромбічного» класифікатора для процесів класифікації дисперсних сумішей при переробці рослинної сировини (рисунок 5.7).

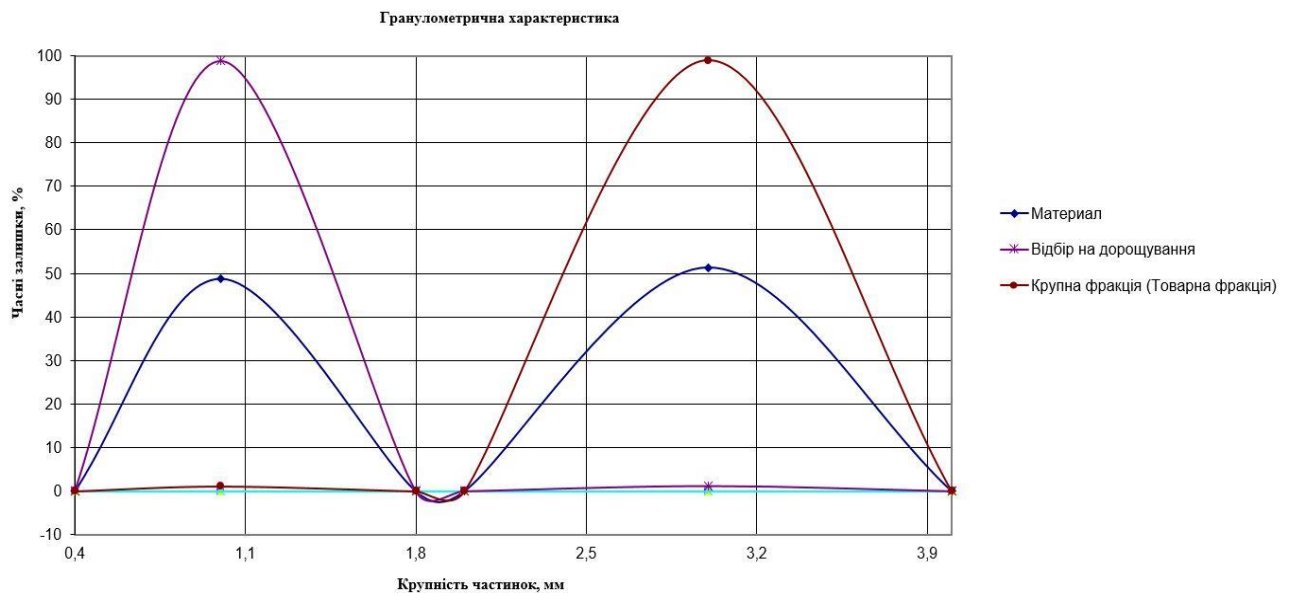
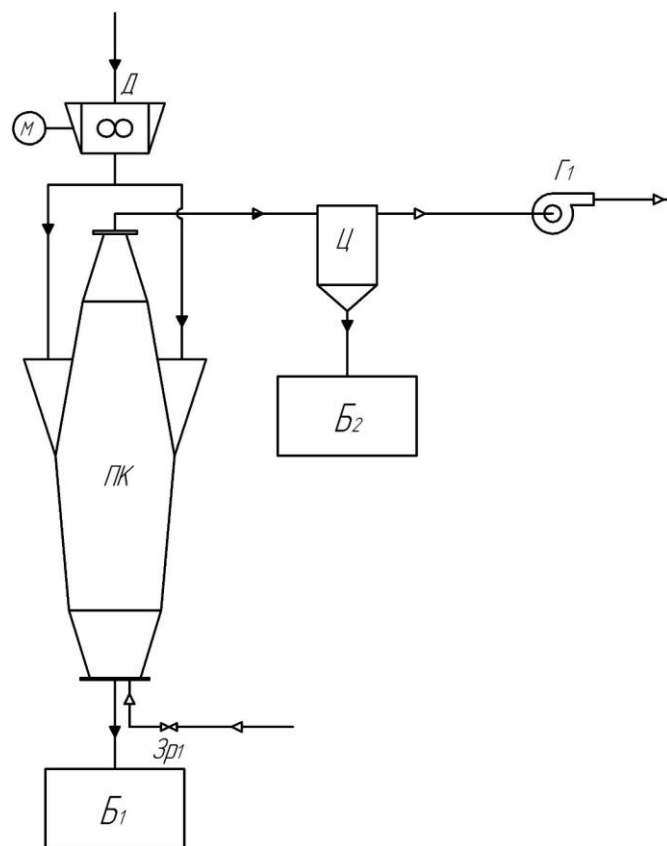


Рисунок 5.6 – Криві розсіву карбаміду по фракціям.

Установка (рисунок 5.7) працює таким чином: вихідна суміш рослинного походження поступає в дробарку Д, після якої поступає у

завантажувальні бункери апарату, із яких потрапляє в середню частину корпусу пневмокласифікатора ПК. В нижню частину апарату поступає повітряний потік, витрата якого регулюється тарованим колектором з регулюючою засувкою Зр₁. Фракція подрібненого листа виноситься потоком повітря із апарату і потрапляє в циклон Ц, де осаджується в бункер Б₂, а повітряний потік виходить в атмосферу. Фракція, що складається із подрібнених стеблинок, просипається в нижню частину апарату і через розподільний пристрій виводиться в бункер Б₁. Всмоктувальний повітряний потік створюється за допомогою газодувки Г₁.



Ц — циклон; ПК — пневмокласифікатор; Г₁ — газодувка для створення всмоктувального потоку; Б₂ — бункер збору дрібної фракції; Б₁ — бункер збору крупної фракції; Зр₁ — тарований колектор з регулюючою засувкою; М — електропривід; Д — валкова дробарка.

Рисунок 5.7 – Структурна схема установки для розділення рослинної сировини на фракції.

За рахунок плоскої форми, подрібнене листя має гарну парусність, що дозволяє йому підхоплюватись газовим потоком і виноситись у верхню частину апарату. Стеблинки мають циліндричну форму, і тому не настільки гарно підхоплюються газовим потоком. При однаковій густині, фракція листя і стеблинок має різні швидкості витання, тому запропонована схема достатньо ефективно розділяє запропонований матеріал на фракції (рисунок 5.8).

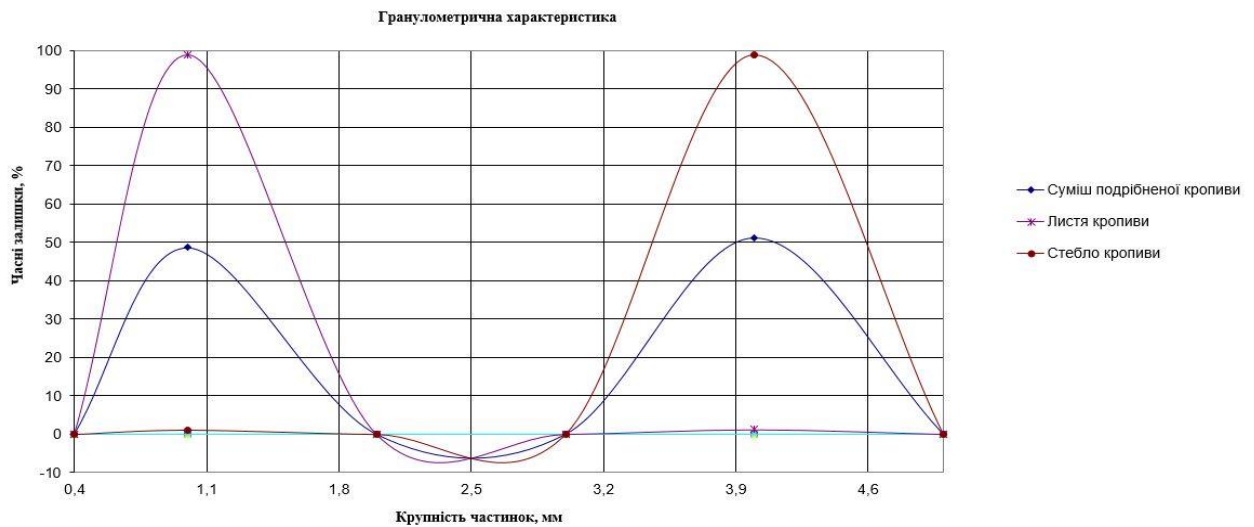


Рисунок 5.8 – Криві розсіву подрібненої кропиви по фракціям.

Висновки до п'ятого розділу

1. Отримані результати експериментальних досліджень та математичного моделювання при визначенні швидкості однофазного газового потоку і концентрацій дрібних частинок у шарі показують їх повне співставлення з похибкою не більше 2%.

2. Розроблено методику розрахунку пневмокласифікатора змінного перетину, а саме визначення розмірів корпусу апарату; визначення швидкості

газового потоку та шару матеріалу; визначення граничної концентрації дрібної фракції у крупній фракції (товарній фракції).

3. Проведений аналіз різних типів класифікаторів показав високу ефективність «ромбічного» пневмокласифікатора за ефективністю вилучення дрібної фракції у винос.

4. Наведено практичне використання наукових результатів дисертаційної роботи в технології отримання гранульованих органо-мінеральних добрив та виробництві лікарської рослинної продукції, що підтверджено відповідним актом впровадження.

Основні результати опубліковано в роботі [154].

ЗАГАЛЬНІ 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 (акт впровадження – додаток Д).

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Nagel R. Klassifizierung der Windsichter / R. Nagel // Staub – Reinhalt Luft. – 1968 – Bd.28, №6. – s.27 – 30.
2. Ушаков С.Г. Инерционная сепарация пыли / С.Г. Ушаков, Н.И. Зверев. – М.: Энергия, 1974. –168с.
3. Leschonski K. Probleme des Stronungstrennverfahren, dargestellt an Beispiel der Windsichtung/ K. Leschonski //Aufbereitungs – Technik – 1967 – Bd.13, №12. – s.754 – 759.
4. Барский М.Д. Фракционирование порошков / М.Д. Барский – М.: Недра – 1980. – 327 с.
5. Boyadjiev Chr.B. Non-linear mass transfer and hydrodynamic stability / Chr.B. Boyadjiev, V.N. Babak – Amsterdam: Elsevier Science B.V., 2000. – 500 p.
6. Kudra T. Advanced Drying Technologies / T. Kudra, A. S. Mujumdar – New York: Marcel Dekker, 2002. – 459 p.
7. Смышляев Г.К. Воздушная классификация в технологии переработки полезных ископаемых / Г.К. Смышляев – М.: Недра – 1969. – 102 с.
8. Barsky E. Master curve of separation processes / E. Barsky, M. Barsky // Physical Separation in Science in Engineering. – 2004. – Vol. 13. №1 – P. 1-13.
9. Ушаков С.Г. Исследование и разработка методов расчёта процессов сепарации дисперсных систем: дис. ... докт. техн. наук / С.Г. Ушаков – М.– 1978. – 421 с.
10. Калмыков А.В. Техника и технология сухого обеспыливания углей на обогатительных фабриках передовых угледобывающих стран / А.В Калмыков, В.В. Трайнис – М.: ЦНИЭуголь – 1979. – 34 с.
11. Дуда В. Цемент / В. Дуда – М.: Стройиздат – 1981. – 264 с.
12. Makkawi. Yassir T. Mass Transfer in Fluidized Bed Drying of Moist Particulate / Yassir T. Makkawi, Raffaella Ocone // Mass Transfer in Multiphase Systems and its Applications Edited by Mohamed El-Amin. – InTech, 2011. – 780 p.

13. Мизонов В.Е. Формирование дисперсного состава и массопотоков сыпучих материалов в технологических системах измельчения: дис. ... докт. техн. наук / В.Е. Мизонов – М.– 1984. – 452 с.
14. Klumpar I.V. Air Classifiers / I.V. Klumpar, F.N. Currier, T.A. Ring // Chemical Engineering. – 1986. – V.23, №5. – s.77 – 92.
15. Мизонов В.Е. Аэродинамическая классификация порошков / В.Е. Мизонов, С.Г. Ушаков – М.:Химия – 1989. – 160 с.
16. Бараков А.В. Моделирование гидродинамики и теплообмена в перемещающемся псевдооживленном слое: дисс. ... доктора техн. наук: 05.14.04 / Бараков Александр Валентинович. – Воронеж, 2005. – 235 с.
17. UA 19-21 марта, 2003: Материалы Конгресса / ISBN5-93121-144-6 – М.: Альтекс. – Т.2– 2003. – с.148 – 150.
18. Пат. 30588 Україна, МПК В07 В 7/00, В07 В 7/01. Пристрій для класифікації зернистих матеріалів/ В.В. Афанасьєв, А.М. Сергєєв; власник: В.В. Афанасьєв, А.М. Сергєєв № 97094815; заявл. 04.03.1998; опубл. 15.12.2000.
19. Пат. 10219586 Німеччина, МПК В07 В 7/01, В07 В 7/083. Спосіб фракціонування сумішей різних твердих частинок / Verfahren zur Fraktionierung einer Mischung unterschiedlicher Festkörperpartikler/ Poppe Torsten; власник: Friedrich-Schiller-Univer.. № 102195862; заявл. 29.04.2002; опубл. 6.11.2003.
20. Барский М.Д. Гравитационная классификация зернистых материалов / М.Д. Барский, В.И. Ревнивцев, Ю.В. Соколкин – М.: Недра – 1974. – 232 с.
21. Донат Е.В. Аппараты со взвешенным слоем для интенсификации технологических процессов / Е.В. Донат, А.И. Голобурдин – М.:Химия – 1993. – 144 с.
22. Лященко П.В. Гравитационные методы обогащения / П.В. Лященко – М.:Металлургиздат – 1940. – 412 с.
23. Буевич Ю.А. Взаимодействие фаз в концентрированных дисперсных системах / Ю.А. Буевич – Журнал прикладной механики и технической физики – 1966. – №3 – с. 115–117.

24. Демский А.Б. Комплектные зерноперерабатывающие установки / А.Б. Демский – М.:Колос – 1978. – 256 с.
25. Шрайбер А.А. Гидромеханика двухкомпонентных потоков с твёрдым полидисперсным веществом / А.А. Шрайбер, В.Н. Милютин, В.П. Яценко – Киев.:Наукова думка – 1987. – 240 с.
26. Пат. №2240873 РФ, МПК В07 В 4/02. Пневматический сепаратор/ И.Т. Ковриков, И.Т. Тавтилов; заявитель и патентообладатель: Оренбург. гос.ун-т. № 2003115894; заявл. 26.10.1998; опубл. 07.03.2000.
27. Кирсанов. В.А. Влияние конструктивных параметров каскадных элементов на эффективность процесса классификации / В.А. Кирсанов, П.В. Кирсанов. – Химическое и нефтегазовое машиностроение. – 2013. – №11. – С.3 – 6.
28. Гельперин Н.И. Основы техники псевдооживления / Н.И. Гельперин, В.Г. Айнштейн, В.Г. Кваша – М.:Химия – 1967. – 664 с.
29. Кушелевский В.Г. Машины и аппараты по обеспыливанию и классификации измельчённого продукта в воздушном потоке / В.Г. Кушелевский, В.А. Глявин, Л.М. Полтавец – М.:ЦНИИИТЭИПП – 1971. – 35 с.
30. Бунин Л.В. Классификаторы для зернистых и порошкообразных продуктов / Л.В. Бунин, Б.М. Берлин, М.Я. Медведовский –М.:ЦНИИИТЭИПП – 1978. – 53 с.
31. Донат Е.В. Гравитационные сепараторы для разделения полидисперсных металлических порошков на фракции / Е.В. Донат – Промышленная вентиляция – Свердловск.:Металлургиздат – 1957. – Вып.№6 – с.67–77.
32. Гельперин Н.И. Об аналогии между псевдооживленным слоем зернистого материала и капельной жидкостью / Н.И. Гельперин, В.Г. Айнштейн – Химическая промышленность – 1961. – №11 – с.750 – 755
33. Фукс Н.А. Механика аэрозолей / Н.А. Фукс – М.:Изд. АН СССР – 1955. – 352 с.
34. Айнштейн В.Г. Псевдооживление / В.Г. Айнштейн, А.П. Баскоков – М.:Химия – 1991. – 398 с.
35. Wen-Ching Yang. Handbook of fluidization and fluid-particle systems / Wen-Ching Yang. – New York: Marcel Dekker, 2003. – 850 p.

36. Григорьев В.В. Сепарация частиц в псевдоожигенном слое / В.В. Григорьев, В.Н. Петров – Нефть и газ – М. – 1974. – с. 111 – 112.
37. Баскаков А.П. Сепарация материалов в аппарате с псевдоожигенным слоем при непрерывной загрузке и выгрузке / А.П. Баскаков – Химическая промышленность – 1974. – №6 – с. 59 – 61.
38. Романков П.Г. Массообменные процессы химической технологии (системы с дисперсной твердой фазой) / П.Г. Романков, В.Ф. Фролов – Л.:Химия – 1990. – 384 с.
39. Кирсанов В.А. Каскадная пневмокласификация сыпучих материалов / В.А. Кирсанов – Ростов н/Д.:Изд-во журн. «Изв.Вузов. Сев.-Кавк.регион» – 2004. – 208 с.
40. Кирсанов В.А. Научные основы и принципы совершенствования процессов и аппаратов каскадной пневмокласификации сыпучих материалов : дис. ... докт. техн. наук / В.А. Кирсанов – Тамбов.– 2005. – 391 с.
41. Kaiser F. Der Zickzack - Sichter- eine Windsichter nach neuere Prinzip / F. Kaiser – Chem. Ing. Tech. – 1963 – Bd. 35 – s.273 – 282.
42. А.с 1461530 СССР, МКИ В07 В 4/02. Пневматический классификатор / В.А. Кирсанов, А.М. Новосёлов, В.А. Таранушич; Бюл.№ 8; заявл. 16.02.1987; опубл. 28.02.1989.
43. А.с 1510958 СССР, МКИ В07 В 4/08. Пневмокласификатор / В.А. Кирсанов, А.М. Новосёлов, А.С. Кондратьев, В.Н. Славянский, Б.Я. Полатов; Бюл.№ 36; заявл. 02.09.1987; опубл. 30.09.1989.
44. А.с 713618 СССР, МКИ В07 В 4/02. Аппарат для классификации зернистых материалов / В.Е. Кравчик, Е.В. Донат, В.А. Кирсанов, В.Д. Вернидуб, С.Д. Авдеев; Бюл.№ 5; заявл. 17.08.1978; опубл. 05.02.1980.
45. А.с 2123391 РФ, МКИ В07 В 4/00, 4/08. Гравитационный пневмокласификатор / В.А. Кирсанов, А.М. Новосёлов, В.Н. Славянский; Бюл.№ 35; заявл. 21.06.1994; опубл. 20.12.1998.

46. Пат. №18958 РФ, МКИ В07 В 4/08. Пневматический классификатор / В.А. Кирсанов, В.В. Титаренко, В.А. Таранушич, М.В. Кирсанов; Бюл.№ 22; заявл. 28.12.1999; опубл. 10.08.2001.
47. Пат.№2185254 РФ, МПК В07 В 4/04. Каскадный пневматический классификатор / Г.В. Викторов, Н.С. Кобелев; заявитель и патентообладатель: Курск, ГТУ; № 2000126170/03; бюл.№22; заявл. 17.10.2000; опубл. 20.07.2001.
48. А.с 58016 СССР, МКИ В07 В 4/00. Пневматический классификатор для разделения зернистых материалов / М.Д. Барский, А.В. Говоров, Ю.П. Канусик, Н.С.Ларьков; Бюл.№ 42; заявл. 15.12.1975; опубл. 15.11.1977.
49. А.с 68824 СССР, МКИ В07 В 4/08. Гравитационный пневматический классификатор / М.Д. Барский, С.Ф. Шишкин, А.В. Говоров; Бюл.№ 36; заявл. 19.04.1978; опубл. 06.10.1979.
50. А.с 799837 СССР, МКИ В07 В 4/08. Пневматический классификатор для разделения сыпучих материалов / М.Д. Барский, А.В. Говоров, Н.С.Ларьков, Ф.С. Шишкин; Бюл.№ 4; заявл. 23.03.1979; опубл. 30.01.1980.
51. А.с 900876 СССР, МКИ В07 В 4/00. Гравитационный пневматический классификатор / М.Д. Барский, С.Ф. Шишкин, В.И. Малагамба, А.П. Ремезов, А.В. Говоров; Бюл.№ 4; заявл. 03.06.1980; опубл. 30.01.1982.
52. А.с 912302 СССР, МКИ В07 В 4/08. Гравитационный пневматический классификатор / М.Д. Барский, С.Ф. Шишкин, А.В. Говоров, Ю.В. Максимов; Бюл.№ 10; заявл. 30.06.1980; опубл. 15.03.1982.
53. А.с 988364 СССР, МКИ В07 В 4/08. Гравитационный пневматический классификатор / М.Д. Барский, С.Ф. Шишкин, В.И. Малагамба, А.П. Ремезов; Бюл.№ 2; заявл. 23.07.1981; опубл. 10.01.1983.
54. А.с 1220822 СССР, МКИ В07 В 4/00. Пневматический классификатор / А.Т. Тентимишев, Б.В. Фомин, А.М. Осмонканов, О.С. Ширнин; Бюл.№ 12; заявл. 28.04.1984; опубл. 30.03.1986.
55. А.с 1776457 СССР, МКИ В07 В 4/08. Гравитационный пневмокласификатор / В.А. Кирсанов, А.М. Новосёлов, В.Н. Славянский, В.А. Таранушич; Бюл.№ 43; заявл. 23.01.1990; опубл. 23.11.1992.

56. Вирченко В.М. Интенсификация процесса пневмоклассификации полидисперсных материалов в гравитационных полочных аппаратах: Дис. ... канд. техн. наук / В.М. Вирченко – Сумы.– 1986. – 131 с.
57. А.с 466056 СССР, МКИ В07 В 4/02. Воздушный сепаратор / И.И. Гарцман, М.И. Цал; Бюл.№ 13; заявл. 31.08.1968; опубл. 22.06.1975.
58. А.с 663449 СССР, МКИ В07 В 4/04. Сепаратор / В.С. Ковалёв, Б.Н. Звягин, В.И. Барулин; Бюл.№ 19; заявл. 04.12.1974; опубл. 06.07.1979.
59. Барский М.Д. О механизме воздушной гравитационной классификации / М.Д. Барский, Е.А. Долганов – Изв.вузов Горный журнал. – 1969. – №1. –с.153 – 156
60. А.с 787113 СССР, МКИ В07 В 4/08. Гравитационный классификатор / М.Д. барский, Н.С. Ларьков; Бюл. № 46; заявл. 09.01.1979; опубл. 15.12.1980.
61. А.с 688248 СССР, МКИ В07 В 4/08. Гравитационный классификатор / М.Д. Барский, С.Ф. Шишкин, А.В. Говоров; Бюл. № 36; заявл. 19.04.1978; опубл. 06.10.1979.
62. А.с 604591 СССР, МКИ В07 В 4/08. Пневматический классификатор / Г.С. Пономарёв, А.А. Павлов, Е.В. Донат, В.В. Новиков; Бюл. № 16; заявл. 25.02.1976; опубл. 30.04.1978.
63. Barsky E., Buikis M. Evaluation of the quality of cascade separation processes / 13th International Conference on Mathematical Modelling and Analysis & 3rd International Conference on Approximation Methods and Orthogonal Expansions. – Tartu, 2008. – P. 1–10.
64. Айнштейн В.Г. Непрерывная классификация зернистых материалов в аппаратах с псевдоожигенным слоем / В.Г. Айнштейн, Б.С. Гордонов, В.В. Захаренко, Т.В. Зелинская – Химическая промышленность. – 1986. – №7. –с.47 – 48.
65. Донат Е.В. Воздушный сепаратор для одновременного разделения полидисперсных материалов на несколько фракций / Е.В. Донат – Химическая промышленность. – 1957. – №4. –с.43 – 45.
66. J.E. Hilton Dynamics of gas–solid fluidized beds with non-spherical particle geometry/ J.E. Hilton, L.R. Mason, P.W. Cleary // Chem. Eng. Sci. 65 – 2010 – P.1584–1596.

67. Глембоцкая Т.В. Возникновение и развитие гравитационных методов обогащения полезных ископаемых / Т.В. Глембоцкая – М.:Наука – 1991. – 256 с.
68. Шилаев В.П. Основы обогащения полезных ископаемых / В.П. Шилаев – М.:Недра – 1986. – 296 с.
69. A. Latz, Hydrodynamic modeling of dilute and dense granular flow / A. Latz, S. Schmidt // *Granul. Matter* 12 (4) – 2010. – P. 387–397.
70. Tingwen Li Numerical investigation of gas mixing in gas–solid fluidized beds/ Tingwen Li, Yongmin Zhang, John R. Grace, Xiaotao Bi // *AIChE J.* – 56 (9) – 2010 – P. 2280–2296.
71. Виноградов Н.Н. Новые направления теории и технологии процессов отсадки полезных ископаемых / Н.Н. Виноградов, Э. Рафалес-Ламарка, К.К. Коллодий и др.– Тр. VIII конгресса обогатителей. – М., – 1968. - Т.1. - С. 279-292.
72. Еремин П.Ф. Определение скорости минеральных зерен при совместном падении / П.Ф. Еремин – Вопросы теории гравитационных методов обогащения полезных ископаемых. – М.: Госгортехиздат, – 1969. - С. 195-197.
73. Таггарт А.Ф. Основы обогащения руд / А.Ф. Таггарт – М.: Металлургиздат, – 1958. - 566 с.
74. J.J. McCarthy Turning the corner in segregation / J.J. McCarthy // *Powder Technology* 192 – 2009 – P.137.
75. Благов И.С. Гравитационные процессы обогащения / И.С. Благов, А.М. Коткин, Т.Г. Фоменко – М.: Госгортехиздат, – 1962. - 232 с.
76. Мушловин Л.Б. Определение и оценка промышленных результатов обогащения полезных ископаемых / Л.Б. Мушловин – М.: Госгортехиздат, – 1963. - 166 с.
77. M.J.V. Goldschmidt Hydrodynamic modelling of dense gas-fluidised beds: comparison and validation of 3D discrete particle and continuum models / M.J.V. Goldschmidt, R. Beetstra, J.A.M. Kuipers // *Powder Technol.* – 142 (1) – 2004 – P.23–47.
78. Бочковский В.М. Расслаивание наиболее важный раздел теории и практики гравитации / В.М. Бочковский – Горный журнал. – 1954. - №1. - С.47-55.

79. Протодьяконов И.О. Гидромеханические основы процессов химической технологии / И.О. Протодьяконов, Ю.Г. Чесноков. – М.: Химия, – 1987. - 360 с.
80. Бусройд Р. Течение газа со взвешенными частицами / Р. Бусройд – М.: Мир, – 1975. - 378 с.
81. Телетов С.Г. Вопросы гидродинамики двухфазных систем / С.Г. Телетов – Вестн. МГУ. Сер. математики, механики, астрономии, физики, химии. – М.: Изд-во МГУ, – 1958, – №2. – С. 15-27.
82. Баренблатт Г.И. О движении взвешенных частиц в турбулентном потоке / Г.И. Баренблатт – Прикладная математика и механика, – 1953. - Т.17, №3. – С.261-274.
83. Hiltunen K. Multiphase Flow Dynamics. Theory and Numerics / Hiltunen K., Jasberg A., Kallio S. – Helsinki: Edita Prima Oy, 2009. – 113 p.
84. Броунштейн Б.И. Обтекание твердых сферических частиц, взвешенных в турбулентном потоке / Б.И. Броунштейн, О.М. Годес. – Труды гос. ин-та прикладной химии. – 1960. – №46. – С. 126-136.
85. Rodriguez-Rojo S. Hydrodynamic Modeling of Supercritical Fluidized Bed: Eulerian Approach / S. Rodriguez-Rojo, J. Sierra-Pallares, T. Parra-Santos, F. Castro, M.J. Cocero // 9th International Symposium on Supercritical Fluids. – 2009. Volume 1. – Arcachon, 2009. – P. 591 – 593.
86. Crowe Clayton T. Multiphase flow handbook / Clayton T. – Boca Raton: Taylor & Francis Group. – 2006. – 1128 p.
87. Франкль Ф.И. Уравнение энергии для движения жидкостей со взвешенными наносами / Ф.И. Франкль – Докл. АН СССР. – 1955. –.102, №5. – С. 903-906.
88. Горбис З.Р. Теплообмен и гидромеханика дисперсных сквозных потоков / З.Р. Горбис. – М.: Энергия, – 1970. – 424 с.
89. Донат Е.В. Взвешивание и перенос твердых частиц в технологических аппаратах и трубопроводах. Система "газ-твердые частицы": Дис. ... докт. техн. наук. / Е.В. Донат – М.: МИХМ, – 1971. – 267 с.
90. Франкль Ф.И. К теории движения взвешенных наносов / Ф.И. Франкль. – Избранные труды по газовой динамике. – М.: Наука, – 1973. – С. 669-687.

91. Слезкин Н.А. Основные уравнения движения деформируемой среды частиц с переменной массой / Н.А. Слезкин. – Докл.АН СССР. – 1951. – Т.79, №1 – С.33-36.
92. Медников Е.П. Турбулентный перенос и осаждение аэрозолей / Е.П. Медников. – М.: Наука, – 1980. – 176 с.
93. Медников Е.П. Теория турбулентного переноса взвешенных частиц в проточных аэро- и гидродисперсных средах / Е.П. Медников. – Теоретические основы химической технологии. – 1986. – Т.XX, №3. – С.366-374.
94. Марцулевич Н.А. Хаотическое движение частиц в турбулентном потоке газа / Н.А. Марцулевич. – Теоретические основы химической технологии. – 1987. – Т.XXI, №3. – С.362-367.
95. Гельперин Н.И. Аналогия между дисперсными системами и сплошными средами / Н.И. Гельперин, В.Г. Айнштейн. – Химическая промышленность. – 1987. – №12. – С.32 – 36.
96. Лева М. Псевдооживление / М. Лева – Пер. с англ. под ред. Н.И.Гельперина. – М.:Гостоптехиздат, – 1961. – 400 с.
97. Дэвидсон Дж. Псевдооживление / Дж. Дэвидсон, Д. Харрисон. – Пер. с англ. под ред. Н.И.Гельперина. – М.: Химия, – 1973. – 725 с.
98. Кондуков Н.Б. Теория равновесия бинарных систем в применении к псевдооживленному слою и начальная скорость переходной области / Н.Б. Кондуков, М.Х. Сосна. – Химическая промышленность, – 1965. – №6. – С.402-406.
99. Донат Е.В. Определение дисперсного состава фракций, получаемых в гравитационных сепараторах / Е.В. Донат. – Промышленная вентиляция: Сб. ст. Свердловск: Metallurgizdat, – 1957. – Вып.6. – С.37-39.
100. Донат Е.В. Исследование уноса частиц изполидисперсного псевдооживленного слоя / Е.В. Донат, Г.С. Пономарев, В.А. Кирсанов. – Химия и технология топлив и масел. – 1976. – №7. – С.33-37.

101. Пономарев Г.С. Исследование процесса классификации зернистых материалов в аппаратах с провальной решеткой : Дис. ... канд. техн. наук. / Г.С. Пономарев – Пермь. – 1974. – 138 с.
102. Никитин В.Г. Исследование процесса классификации тонкодисперсных материалов: Дис ... канд. техн. наук / В.Г. Никитин. – М.: МИХМ, – 1977. – 218 с.
103. Плановский А.Н. Расчет эффективности многоступенчатых систем для классификации порошков / А.Н. Плановский, В.Г. Никитин, А.Б. Бассель. – Теоретические основы химической технологии. – 1977. – Т.ХІ, №1. – С. 113-116.
104. Кондуков Н.Б. Гидродинамические особенности и условия подобия в переходном режиме псевдооживления / Н.Б. Кондуков.– Инженерно-физический журнал.– 1961.– Т.4, – №3. – С.31-38.
105. Шохин В.Н. Гравитационные методы обогащения. / В.Н. Шохин., А.Г. Лопатин.– М.: Недра, – 1980. – 400 с.
106. Рабинович С.Г. Погрешность измерений / С.Г. Рабинович. – Л.: Энергия, 1978. – 261 с.
107. Шенк Х. Теория инженерного эксперимента / Х. Шенк. – М.: Мир, 1972. – 381 с.
108. Толубинский Е.В. Теория процессов переноса. / Е.В. Толубинский. – Киев: Наукова думка, – 1969. – 259 с.
109. Протодьяконов И.О. Статистическая теория явлений переноса в процессах химической технологии. / И.О. Протодьяконов, С.Р. Богданов. – Д.: Химия, – 1983 – 400 с.
110. Шрайбер А.А. Турбулентные течения газозвеси / А.А. Шрайбер., Л.Б. Гавин, В.А. Наумов, В.П. Яценко. – Киев: Наукова думка, – 1987. – 240 с.
111. Кирсанов В.А. Научные основы и принципы совершенствования процессов и аппаратов каскадной пневмокласификации сыпучих материалов: дисс. ... доктора техн. наук: 05.17.08 / Кирсанов Виктор Александрович. – Новочеркасск, – 2005. – 391 с.
112. Нигматулин Р.И. Основы механики гетерогенных сред. / Р.И. Нигматулин. – М.: Наука, – 1978. – 336 с.

113. Лойцянский Л.Г. Механика жидкости и газа. / Л.Г. Лойцянский. – М.: Наука, – 1978. – 736 с.
114. Островский Г.М. Пневматический транспорт сыпучих материалов в химической промышленности. / Г.М. Островский. – Л.: Химия, – 1984. – 104 с.
115. Исмаилов Р.Ш. К теории двухфазных потоков с переменной массой / Р.Ш. Исмаилов, Р.Х. Абдуллаев. – Журнал прикладной химии. – 1990. – №8. – С. 1662-1666.
116. Непомнящий Е.А. Определение характеристики процесса разделения сыпучих смесей с учетом гравитационного течения частиц / Е.А. Непомнящий – Изв. Ленингр. электротехн. ин-та. – 1963. – Вып. 18. – С.317-325.
117. S. Heinrich Particle population modeling in fluidized bed spray granulation — analysis of the steady state and unsteady behavior / S. Heinrich, M. Peglow, M. Ihlow, L. M?rl // Powder Technol. – 130 – 2003 – P.154 – 161.
118. Леви П. Стохастические процессы и броуновское движение / П. Леви. – М.: Наука, – 1972. – 375 с.
119. Юхименко Н.П. Аппараты взвешенного слоя / Н.П. Юхименко, С.В. Вакал, Н.П. Кононенко, А.П. Филонов. – Сбор. – 2003. – 304 с.
120. Мизонов В.Е. К расчету центробежных классификаторов порошкообразных материалов / В.Е. Мизонов, С.Г. Ушаков. – Теоретические основы химической технологии. – 1980. – Т. XXV – №5. – С.784-786.
121. Мизонов В.Е. Разработка и исследование стохастических моделей разделения пол и дисперсных порошков в осесимметричных вихревых потоках / В.Е. Мизонов, С.Г. Ушаков, К.Б. Кушеров. – Механика сыпучих материалов: Тез. докл. IV Всесоюз. конф. – Одесса, – 1980. – С.27-28.
122. Кутепов А.М. Стохастический анализ гидромеханических процессов разделения гетерогенных систем / А.М. Кутепов. – Теоретические основы химической технологии. – 1987. – Т. XXI, – №2. – С. 147-156.
123. Дейч В.Г. О вычислении сепарационной характеристики в стохастической теории разделительных процессов / В.Г. Дейч. – Теоретические основы химической технологии. – 1987. – Т. XXI, – №3. – С.411-415.

124. K. Johanson Quantitative measurement of particle segregation mechanisms/ К. Johanson, С. Eckert, D. Ghose, M. Djomlija, M. Hubert. // Powder Technology. – 159 – 2005. – P. 1.
125. Бабуха Г.Л. Экспериментальное исследование соударений частиц двухфазного потока со стенками вертикального канала / Г.Л. Бабуха, Г.И. Сергеев. – Вопросы технической теплофизики. Киев: Наукова думка, – 1968. - Вып. 1. – С. 31-36.
126. Бабуха Г.Л. Экспериментальное исследование движения дисперсного материала в восходящей газозвеси / Г.Л. Бабуха, М.И. Рабинович, Г.И. Сергеев, А.А. Шрайбер. – Инженерно-физический журнал. – 1969. – Т.ХVI, – №4. – С.639-646.
127. Донат Е.В. Разработка и исследование аппаратов взвешенного слоя для интенсификации технологических процессов / Е.В. Донат, Н. П. Юхименко // Вісник Сумського державного університету. Серія Технічні науки. – 2001. – №9(30)-10(31). – С. 16–21.
128. Левич В.Г. Кинематическая теория псевдооживленного слоя / В.Г. Левич, В.П. Мясников. – Химическая промышленность. – 1966. – №6. – С.4-8.
129. Мясников В.И. Состояние механики дисперсных сред и ее приложение в технологических процессах / В.И. Мясников, В.В. Струминский. – IV Весесоюз. съезд по теор. и прикл. механике, Киев, 21-28 мая 1976 г. – Киев: Наукова думка. – 1976. – С.68.
130. Струминский В.В. Аэродинамика и молекулярная газовая динамика / В.В. Струминский. – М.:Наука. – 1985. – 240 с.
131. Силин Н.А. Гидротранспорт / Н.А. Силин, Ю.К. Витошкин, В.М. Карасик, В.Ф. Очеретько. – Киев: Наукова думка. – 1971. – 159 с.
132. Криль С.И. Энергобаланс взвесенесущего потока и его следствия / С.И. Криль. – Гидромеханика. – Киев. 1976. – Вып.34. – С.72-78.
133. Мясников В.П. О динамических уравнениях движения двухкомпонентных систем / В.П. Мясников. – Журнал прикладной механики и технической физики. – 1967. – №2 – С.58-67.

134. Мясников В.П. Кинетическая модель процессов теплопереноса в кипящем слое / В.П. Мясников. – Изв. АН СССР. – Механика жидкости и газа. – 1967 – №4, – С. 84-90.
135. Цибаров В.А. Уравнения гидродинамики псевдооживленного слоя / В.А. Цибаров. – Вестник Ленингр. ун-та. – 1976. – Т.3. – №13. – С.170-176.
136. Майков В.П. Энтروпийные методы моделирования / В.П. Майков. – М.: МИХМ.– 1983 – 80 с.
137. Барский М.Д. Оптимизация процессов разделения зернистых материалов / М.Д. Барский. – М.: Недра. – 1978. – 168 с.
138. Авдеев С.Д. Основы теории и эксперимента процесса пневмокласификации / С.Д. Авдеев, Е.В. Донат. – Новочерк. политехн. ин-т. – Новочеркасск. – 1987. – 169 с.
139. Великанов М.А, Русловой процесс / М.А. Великанов – М.: Гос. изд-во физ.-мат. лит-ры. – 1958. – 395 с.
140. Смолдырев А.Е. Трубопроводный транспорт / А.Е. Смолдырев. – М.:Госгортехиздат. – 1961. – 286 с.
141. Барский Л.А. Системный анализ в обогащении полезных ископаемых / Л.А. Барский, В.З. Козин. – М.: Недра. – 1978. – 486 с.
142. Рахматулин Х.А Основы газодинамики взаимопроникающих движений сжимаемых сред / Х.А. Рахматулин. – Прикладная математика и механика. – 1956.– Т.20. – №2. – С.24-28.
143. Акопов М.Г. Гравитационные и специальные методы обогащения мелких классов углей / М.Г. Акопов, И.С. Благов, Г.М. Бунин. – М.: Недра. – 1975. – 248 с.
144. Непомнящий Е.А. Кинетика смешивания и сепарирования в неоднородном полидисперсном слое / Е.А. Непомнящий. – Изв. Ленингр. электротехн. ин-та. – 1971. – Вып.92. – С.72-76.
145. Тихонов О.Н. Введение в динамику массопереноса процессов обогатительной технологии / О.Н. Тихонов. – Л.: Недра. – 1973. – 240 с.

146. Губанов А.М. Поперечное движение частиц в турбулентных потоках / А.М. Губанов, А.М. Кутепов. – Теоретические основы химической технологии. – 1988. – Т.XXI. – №4. – С.488-495.
147. Molerus O. Darstellung von Windsichtertrenn – kurven durh ein stochastisches Modell / O. Molerus, H. Hoffmann. – 1969. – Bd.41. – №5 – 6. S.340-344.
148. Мизонов В.Е. Стохастическая модель равновесной классификации порошков / В.Е. Мизонов. – Теоретические основы химической технологии. – 1984. – Т.XVIII.– №6. – С.811-815.
149. Мизонов В.Е. К расчету разделительной способности вихревых классификаторов / В.Е. Мизонов, С.Г. Ушаков. – Журнал прикладной химии. – 1984. – №7, – С.1539-1544.
150. 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.
151. Литвиненко А.В. Пневматическая классификация зернистых материалов / А.В. Литвиненко, Н.П. Юхименко // Сборник научных трудов SWorld. «Современные направления теоретических и прикладных исследований 2013». – Выпуск 1. – Т.7. –2013. – С.63-67.
152. 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.
153. 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.
154. 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.

155. 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.
156. 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.
157. 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.
158. 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.
159. 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.

ДОДАТОК А

Данні розрахунків швидкостей витання різних матеріалів

Таблиця А.1

Данні отримані при дослідженні гречки

№ досліду	Маса частинок, г	Показання манометра, мм.водст	Показання манометра, Па	Витрата повітря, м ³ /с	Розрахункова швидкість витання, м/с	Маса виносу в відсотковому відношенні, %
1 (домішки)	0,2	2	19,62	6,46962*10 ⁻⁰⁵	2,347594514	6,896551724
2	0,42	12	117,72	0,000158473	5,750408681	14,48275862
3	0,55	13,5	132,435	0,000168086	6,09922946	18,96551724
4	0,74	15	147,15	0,000177178	6,429152355	25,51724138
5	1,04	16	156,96	0,000182989	6,64	35,86206897
6	1,49	18	176,58	0,000194089	7,042783541	51,37931034
7	1,6	19	186,39	0,000199407	7,235772246	55,17241379
8	1,9	21	206,01	0,00020964	7,607075654	65,51724138
9	2,6	25	245,25	0,000228736	8,3	89,65517241
10	2,9	27	264,87	0,000237709	8,625613022	100

Таблиця А.2

Данні отримані при використанні гречки для визначення залежності швидкості витання від маси матеріалу

№ досліду	Маса частинок, г	Показання манометра, мм.водст	Показання манометра, Па	Витрата повітря, м ³ /с	Розрахункова швидкість витання, м/с
1	0,5	15	147,15	0,0001772	6,429152355
2	1	17	166,77	0,0001886	6,844355339
3	1,5	18,5	181,485	0,0001968	7,139929972
4	2	21	206,01	0,0002096	7,607075654
5	2,5	22	215,82	0,0002146	7,786090161
6	3	24	235,44	0,0002241	8,132305946
7	3,5	26	255,06	0,0002333	8,464372393
8	4	28	274,68	0,0002421	8,783894353
9	4,5	29	284,49	0,0002464	8,93937358
10	5	31	304,11	0,0002547	9,242488842

Таблиця А.3

Данні отримані при використанні домішок для визначення залежності швидкості витання від маси матеріалу

№ досліду	Маса частинок, г	Показання манометра, мм.вод.ст	Показання манометра, Па	Витрата повітря, м ³ /с	Розрахункова швидкість витання, м/с
1	0,5	1,5	14,715	0,0001018	2,033076487
2	1	2	19,62	0,0001175	2,347594514
3	1,5	2,5	24,525	0,0001314	2,624690458
4	2	3	29,43	0,0001439	2,875204341
5	2,5	3,5	34,335	0,0001555	3,105575631
6	3	4	39,24	0,0001662	3,32
7	3,5	4,5	44,145	0,0001763	3,52139177
8	4	5	49,05	0,0001858	3,711872843
9	4,5	5,5	53,955	0,0001949	3,893045081
10	5	6	58,86	0,0002036	4,066152973

Таблиця А.4

Данні отримані при дослідженні карбаміду

№ досліду	Маса частинок, г	Показання манометра, мм.вод.ст	Показання манометра, Па	Витрата повітря, м ³ /с	Розрахункова швидкість витання, м/с	Маса виносу в відсотковому відношенні, %
1	0,15	1,5	14,715	3,96182*10 ⁻⁰⁵	2,033076487	3,06122449
2	0,64	13	127,53	0,000116633	5,985215117	13,06122449
3	1,4	19,5	191,295	0,000142845	7,330361519	28,57142857
4	1,99	21,5	210,915	0,000149992	7,697103351	40,6122449
5	2,2	22	215,82	0,000151726	7,786090161	44,89795918
6	2,5	23	225,63	0,000155136	7,961080329	51,02040816
7	2,95	24	235,44	0,000158473	8,132305946	60,20408163
8	3,61	26	255,06	0,000164944	8,464372393	73,67346939
9	3,84	27	264,87	0,000168086	8,625613022	78,36734694
10	4,9	33	323,73	0,000185826	9,535973993	100

Таблиця А.5

Данні отримані при використанні карбаміду для визначення залежності швидкості витання від маси матеріалу

№ дослідю	Маса частинок, г	Показання манометра, мм.водст	Показання манометра, Па	Витрата повітря, м ³ /с	Розрахункова швидкість витання, м/с
1	0,5	17	166,77	0,0001334	6,844355339
2	1	19	186,39	0,000141	7,235772246
3	1,5	21	206,01	0,0001482	7,607075654
4	2	22	215,82	0,0001517	7,786090161
5	2,5	23	225,63	0,0001551	7,961080329
6	3	24	235,44	0,0001585	8,132305946
7	3,5	26	255,06	0,0001649	8,464372393
8	4	27	264,87	0,0001681	8,625613022
9	4,5	28	274,68	0,0001712	8,783894353
10	5	30	294,3	0,0001772	9,092194455

Таблиця А.6

Данні отримані при дослідженні насіння моркви

№ дослідю	Маса частинок, г	Показання манометра, мм.водст	Показання манометра, Па	Витрата повітря, м ³ /с	Розрахункова швидкість витання, м/с	Маса виносу в відсотковому відношенні, %
1	0,03	1	9,81	3,81306*10 ⁻⁰⁵	1,66	2,564102564
2	0,07	3	29,43	6,60442*10 ⁻⁰⁵	2,875204341	5,982905983
3	0,18	4	39,24	7,62613*10 ⁻⁰⁵	3,32	15,38461538
4	0,37	4,5	44,145	8,08873*10 ⁻⁰⁵	3,52139177	31,62393162
5	0,49	5	49,05	8,52627*10 ⁻⁰⁵	3,711872843	41,88034188
6	0,7	6	58,86	9,34006*10 ⁻⁰⁵	4,066152973	59,82905983
7	0,85	6,5	63,765	9,72144*10 ⁻⁰⁵	4,232186196	72,64957265
8	0,91	7	68,67	0,000100884	4,391947176	77,77777778
9	1,04	8	78,48	0,00010785	4,695189027	88,88888889
10	1,17	10	98,1	0,00012058	5,249380916	100

Таблиця А.7

Данні отримані при використанні насіння моркви для визначення залежності швидкості витання від маси матеріалу

№ досліджу	Маса частинок, г	Показання манометра, мм.водст	Показання манометра, Па	Витрата повітря, м ³ /с	Розрахункова швидкість витання, м/с
1	0,5	5	49,05	8,526*10 ⁻⁰⁵	3,711872843
2	1	6	58,86	9,34*10 ⁻⁰⁵	4,066152973
3	1,5	7	68,67	0,0001009	4,391947176
4	2	8	78,48	0,0001078	4,695189027
5	2,5	9,5	93,195	0,0001175	5,116463622
6	3	10	98,1	0,0001206	5,249380916
7	3,5	10,5	103,005	0,0001236	5,37901478
8	4	11	107,91	0,0001265	5,505597152
9	4,5	11,5	112,815	0,0001293	5,629333886
10	5	12	117,72	0,0001321	5,750408681

Таблиця А.8

Данні отримані при дослідженні проса

№ досліджу	Маса частинок, г	Показання манометра, мм.водст	Показання манометра, Па	Витрата повітря, м ³ /с	Розрахункова швидкість витання, м/с	Маса виносу в відсотковому відношенні, %
1	0,02	1	9,81	3,73147*10 ⁻⁰⁵	1,66	0,689655172
2	0,08	10	98,1	0,000117999	5,249380916	2,75862069
3	0,5	15	147,15	0,000144519	6,429152355	17,24137931
4	0,83	17	166,77	0,000153852	6,844355339	28,62068966
5	1,23	18	176,58	0,000158313	7,042783541	42,4137931
6	1,6	19	186,39	0,000162651	7,235772246	55,17241379
7	1,92	20	196,2	0,000166876	7,423745685	66,20689655
8	2,1	21	206,01	0,000170997	7,607075654	72,4137931
9	2,51	22	215,82	0,000175021	7,786090161	86,55172414
10	2,9	24	235,44	0,000182804	8,132305946	100

Таблиця А.9

Данні отримані при використанні проса для визначення залежності швидкості витання від маси матеріалу

№ досліду	Маса частинок, г	Показання манометра, мм.водст	Показання манометра, Па	Витрата повітря, м ³ /с	Розрахункова швидкість витання, м/с
1	0,5	15	147,15	0,0001445	6,429152355
2	1	17	166,77	0,0001539	6,844355339
3	1,5	19	186,39	0,0001627	7,235772246
4	2	21	206,01	0,000171	7,607075654
5	2,5	22	215,82	0,000175	7,786090161
6	3	23	225,63	0,000179	7,961080329
7	3,5	23,5	230,535	0,0001809	8,047148563
8	4	24	235,44	0,0001828	8,132305946
9	4,5	25	245,25	0,0001866	8,3
10	5	26	255,06	0,0001903	8,464372393

Таблиця А.10

Данні отримані при дослідженні редису

№ досліду	Маса частинок, г	Показання манометра, мм.водст	Показання манометра, Па	Витрата повітря, м ³ /с	Розрахункова швидкість витання, м/с	Маса виносу в відсотковому відношенні, %
1	0,01	0,5	4,905	2,62797*10 ⁻⁰⁵	1,173797257	0,666666667
2	0,05	8	78,48	0,000105119	4,695189027	3,333333333
3	0,09	9,5	93,195	0,000114551	5,116463622	6
4	0,4	13	127,53	0,000134001	5,985215117	26,66666667
5	0,6	14,5	142,245	0,000141521	6,321091678	40
6	0,78	16	156,96	0,000148661	6,64	52
7	0,87	17	166,77	0,000153236	6,844355339	58
8	1,24	19	186,39	0,000161999	7,235772246	82,66666667
9	1,35	20	196,2	0,000166208	7,423745685	90
10	1,5	22	215,82	0,00017432	7,786090161	100

Таблиця А.11

Данні отримані при використанні редису для визначення залежності швидкості витання від маси матеріалу

№ дослідю	Маса частинок, г	Показання манометра, мм.водст	Показання манометра, Па	Витрата повітря, м ³ /с	Розрахункова швидкість витання, м/с
1	0,5	15	147,15	0,0001439	6,429152355
2	1	16	156,96	0,0001487	6,64
3	1,5	17	166,77	0,0001532	6,844355339
4	2	18,5	181,485	0,0001599	7,139929972
5	2,5	19	186,39	0,000162	7,235772246
6	3	20	196,2	0,0001662	7,423745685
7	3,5	21	206,01	0,0001703	7,607075654
8	4	22	215,82	0,0001743	7,786090161
9	4,5	23,5	230,535	0,0001802	8,047148563
10	5	24	235,44	0,0001821	8,132305946

ДОДАТОК Б

Алгоритм математичних перетворень для визначення швидкості w_H при різних значеннях коефіцієнта n .

$$\frac{dW_{Iz}}{c} \left(\frac{W_{Iz} \cdot D_{\text{э}}}{\nu} \right)^n = - \frac{W_{Iz} dz}{2D_{\text{э}}}$$

$$\frac{dW_{Iz}}{w^{-(1+n)}} = - \frac{c\nu^n}{2D_{\text{э}}^{1-n}}$$

$$\int_{w_0}^w \frac{dw}{w^{1+n}} = - \frac{c\nu^n}{2} \int_0^z \frac{dz}{(d_0 + z \cdot \text{tg} \alpha)^{1+n}}$$

1) $n=0$

$$\ln \frac{w}{w_0} = - \frac{c}{\text{tg} \alpha} \ln \frac{d_0 + z \cdot \text{tg} \alpha}{d_0}$$

$$\frac{w}{w_0} = e^{-\frac{c}{2\text{tg} \alpha} \cdot \frac{d_0 + z \cdot \text{tg} \alpha}{d_0}}$$

$$\frac{dw}{w} = - \frac{c \cdot d_z}{2(d_0 + \theta_z)}$$

$$\text{де } \theta = \frac{D_1^{\text{max}} - d_0}{H_1} = \text{tg} \alpha$$

$$w_{(z)} = w_0 \cdot \left[\frac{d_{(z)}}{d_0} \right]^{\frac{c}{2\theta}}$$

2) $n \neq 0$

$$\int_{w_0}^w \frac{dw}{w^{1-n}} = -\frac{c\nu^n}{2} \int_0^z \frac{d_z}{(d_0 + z \cdot \text{tg} \alpha)^{1+n}}$$

$$\frac{w^n}{n} \Big|_{w_0}^w = -\frac{c\nu^n}{2\theta^{n+1}} \int_0^z \frac{d_z \left(z + \frac{d_0}{\theta} \right)}{\left(z + \frac{d_0}{\theta} \right)^{n+1}}$$

$$w^n \Big|_{w_0}^w = \frac{c\nu^n}{2\theta^{n+1}} \cdot \left(z + \frac{d_0}{\theta} \right)^{-n} \Big|_0^z$$

$$w^n - w_0^n = \frac{c\nu^n}{2\theta} \cdot \frac{1}{d^n(z)} \Big|_0^z$$

$$w^n - w_0^n = -\frac{c\nu^n}{2\theta} \left[\frac{1}{d^n(0)} - \frac{1}{d^n(z)} \right]$$

$$w_{(z)} = \left\{ w_0^n - \frac{c\nu^n}{2\theta} \left[\frac{1}{d^n(0)} - \frac{1}{d^n(z)} \right] \right\}^{\frac{1}{n}}$$

де $d^n(z) = (d_0 + z \cdot \theta)^n$

3) $n=1$

$$\frac{dw \cdot dz}{c} \cdot \frac{wd}{v} = -\frac{w}{2d}$$

$$dw = -\frac{cvdz}{2d^2}$$

$$w - w_0 = -\frac{cv}{2\theta^2} \int_0^z \frac{d_z \left(z + \frac{d_0}{\theta} \right)}{\left(z + \frac{d_0}{\theta} \right)^2}$$

$$w = w_0 - \frac{cv\theta}{2} \cdot \frac{1}{d(z)} \Big|_z^0$$

$$w = w_0 - \frac{cv\theta}{2} \cdot \left[\frac{1}{d_0} - \frac{1}{d(z)} \right]$$

ДОДАТОК В

Лістинг програми для розрахунку гідродинаміки руху однофазного і двофазного потоку, а також процесу пневмокласифікації

ORIGIN:=1
XXXXXXXXXX

X :=

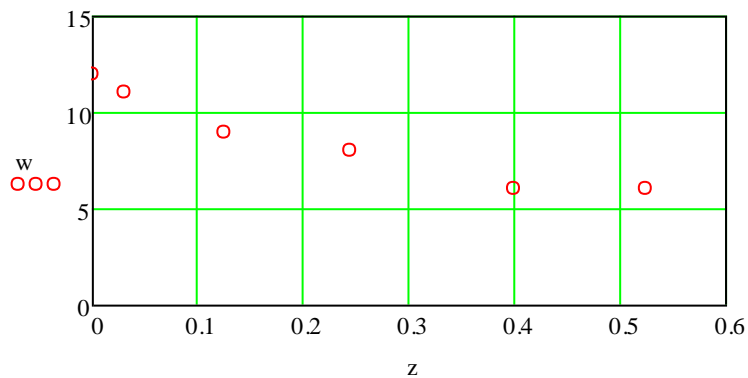
	1	2	3
1	0.1	12	0
2	0.135	11	0.03
3	0.195	9	0.125
4	0.235	8	0.245
5	0.26	6	0.4
6	0.28	6	0.525
7			

$\theta := 0.8$ $v := 1.522 \times 10^{-5}$

$N := \text{rows}(X)$

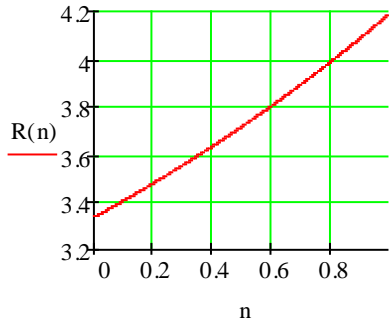
$d := X^{(1)}$

$w := X^{(2)}$ $z := X^{(3)}$



$$C(n) := \frac{2 \cdot \theta \cdot \sum_{k=1}^N \left[\left[\frac{1}{(d_1)^n} - \frac{1}{(d_k)^n} \right] \cdot \left[(w_1)^n - (w_k)^n \right] \right]}{v^n \cdot \sum_{k=1}^N \left[\frac{1}{(d_1)^n} - \frac{1}{(d_k)^n} \right]^2}$$

$$R(n) := \sum_{k=1}^N \left[\left[\left(w_1 \right)^n - \frac{C(n) \cdot v^n}{2 \cdot \theta} \cdot \left[\frac{1}{(d_1)^n} - \frac{1}{(d_k)^n} \right] \right]^{\frac{1}{n}} - w_k \right]^2$$

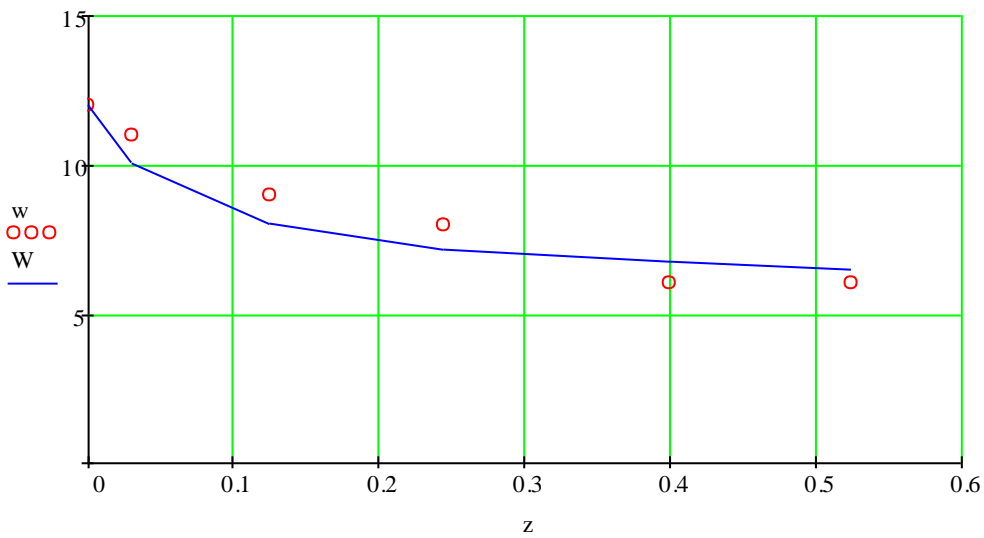


$C(0.000000000) = 0.959$

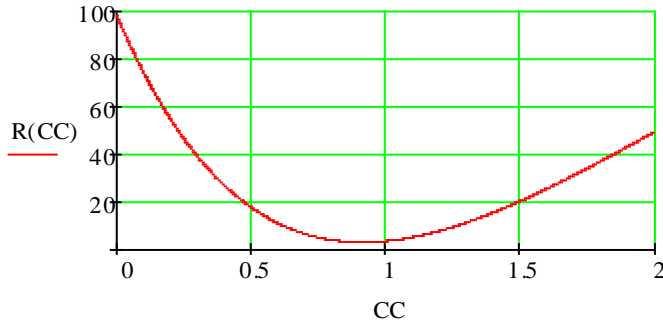
$n := 0.00$

$k := 1..N$

$$W_k := \left[\left(w_1 \right)^n - \frac{C(n) \cdot v^n}{2 \cdot \theta} \cdot \left[\frac{1}{(d_1)^n} - \frac{1}{(d_k)^n} \right] \right]^{\frac{1}{n}}$$

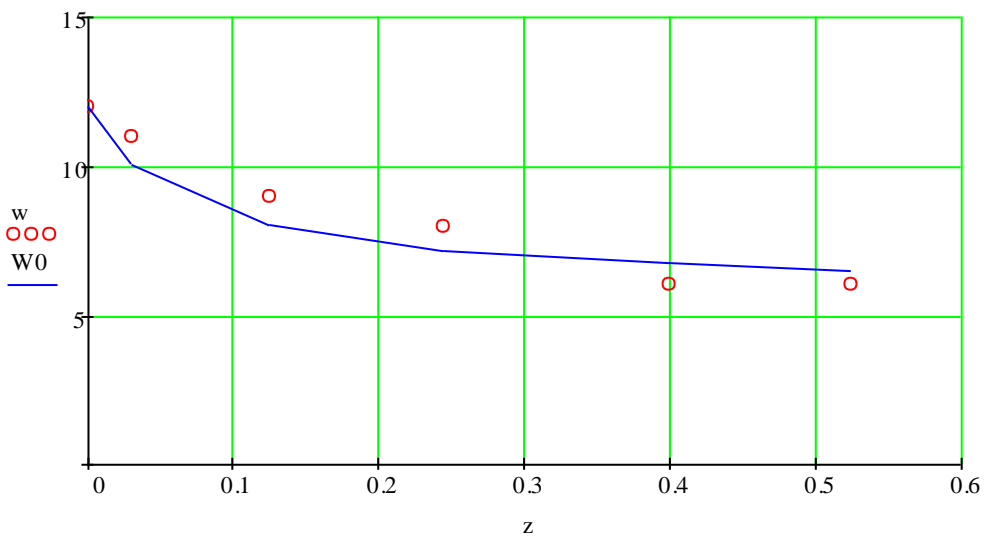


$$R(\text{CC}) := \sum_{k=1}^N \left[w_1 \cdot \left(\frac{d_k}{d_1} \right)^{-\frac{\text{CC}}{2\theta}} - w_k \right]^2$$



$$C := 2\theta \cdot \frac{\sum_{k=1}^N \left(\ln \left(\frac{d_1}{d_k} \right) \cdot \ln \left(\frac{w_k}{w_1} \right) \right)}{\sum_{k=1}^N \left(\ln \left(\frac{d_1}{d_k} \right) \right)^2} = 0.959$$

$$w_{0k} := w_1 \cdot \left(\frac{d_k}{d_1} \right)^{-\frac{C}{2\theta}}$$



Y :=

	1	2
1	0	12
2	0.038	8
3	0.025	10
4	0.015	11
5		
6		
7		

x := Y^{<1>}

w_x := Y^{<2>}

M := rows(Y)

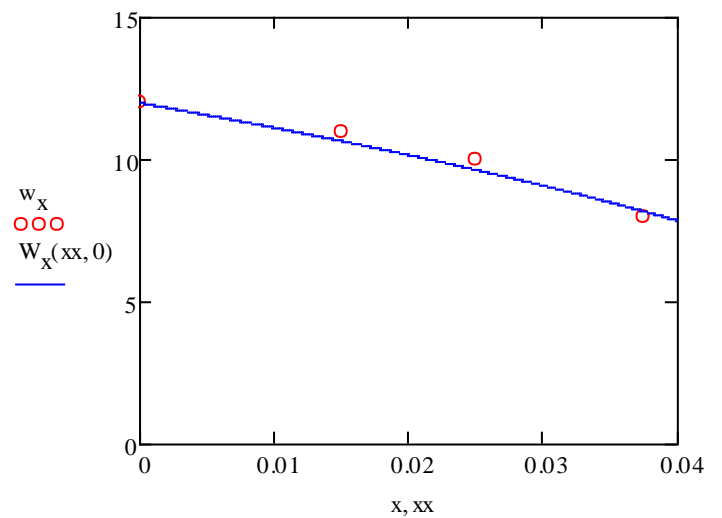
$$B := \sum_{m=1}^M \left(\ln \left(1 - \frac{x_m}{B_2} \right) \cdot \ln \left(\frac{w_{x_m}}{w_1} \right) \right)$$

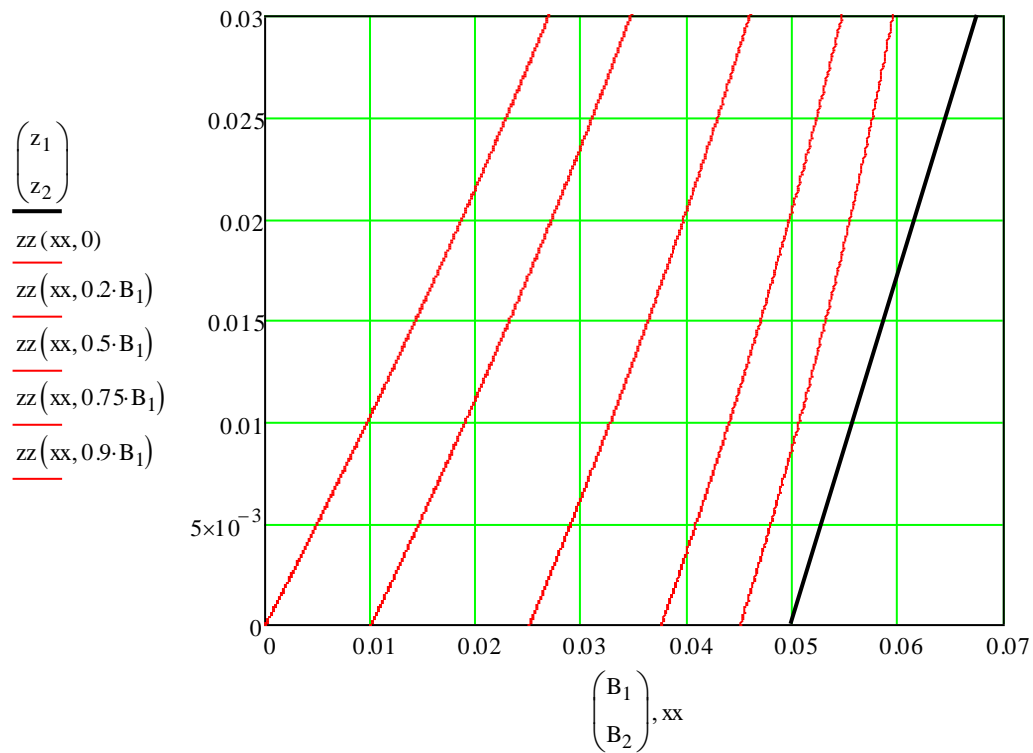
$$n := \frac{B}{\sum_{m=1}^M \ln \left(\frac{w_{x_m}}{w_1} \right)^2} = 2.12$$

W_z(zz) := interp(cspline(z, W0), z, W0, zz)

$$W_x(xx, zz) := W_z(zz) \cdot \left(1 - \frac{xx}{B_2} \right)^{\frac{1}{n}}$$

$$zz(xx, x_0) := \frac{B_2 \cdot n}{n-1} \cdot \left[\left(1 - \frac{x_0}{B_2} \right)^{\frac{n-1}{n}} - \left(1 - \frac{xx}{B_2} \right)^{\frac{n-1}{n}} \right]$$





$$g := -9.81$$

$$\zeta := 0.4$$

$$\rho_g := 1.2$$

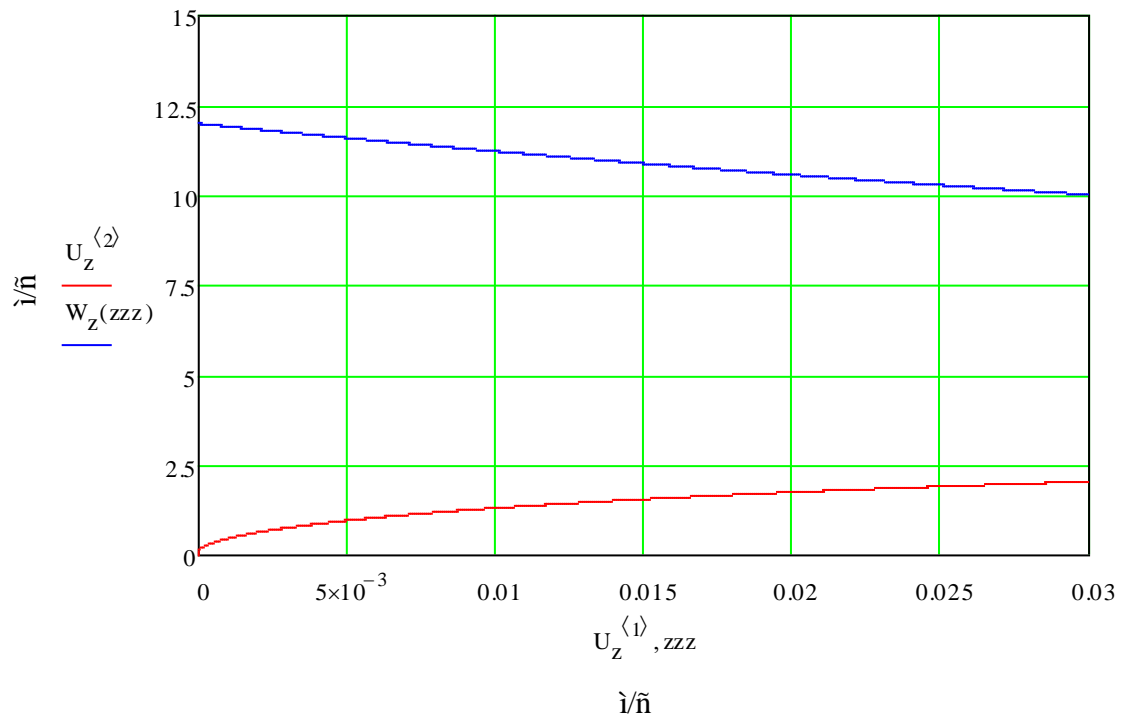
$$\rho_t := 2000$$

$$d_t := 0.3 \cdot 10^{-3}$$

$$U_{z0} := 0.001$$

$$D_z(z, U_z) := \frac{-g + \frac{3}{4} \cdot \zeta \cdot \frac{\rho_g \cdot (W_z(z) - U_{z1})^2}{\rho_t \cdot d_t}}{U_{z1}}$$

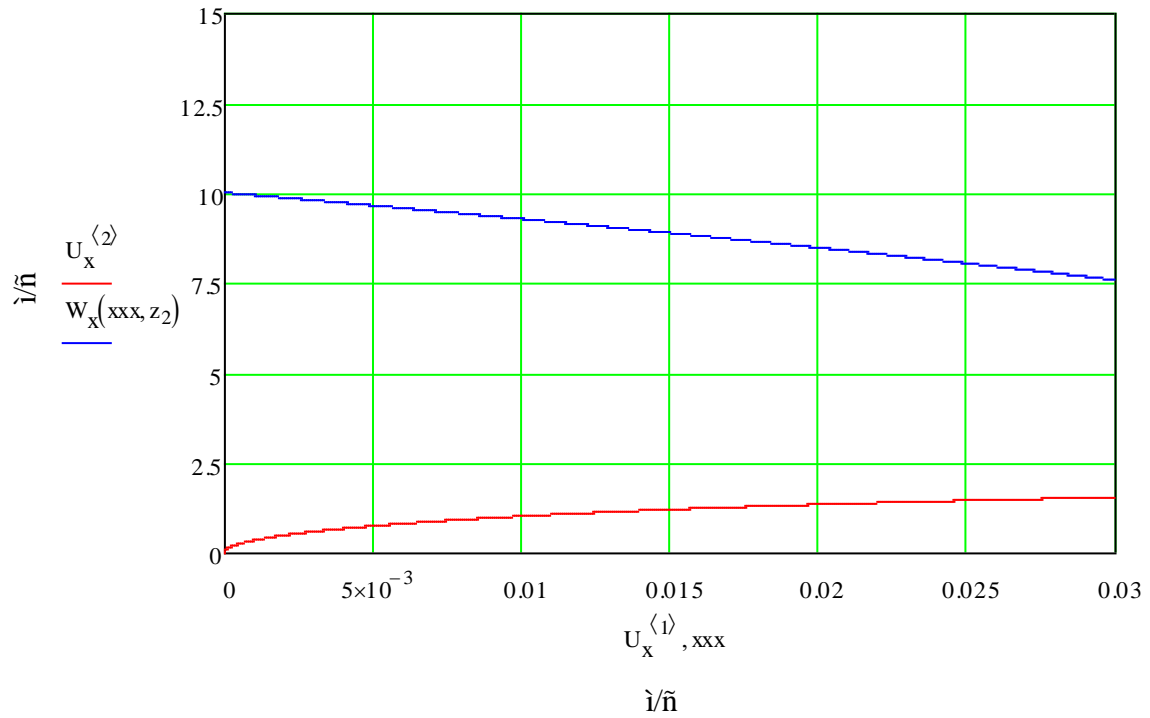
$$U_z := \text{Bulstoer}(U_{z0}, z_1, z_2, 1000, D_z)$$



$$U_{x0} := 0.001$$

$$D_x(xxx U_x) := \frac{\frac{3}{4} \cdot \zeta \cdot \frac{\rho_g \cdot (W_x(xxx z_2) - U_{x1})^2}{\rho_t \cdot d_t}}{U_{x1}}$$

$$U_x := \text{Bulstoer}(U_{x0}, z_1, z_2, 1000, D_x)$$



$$U_x^{(xxx)} := \text{interp}\left(\text{cspline}\left(U_x^{(1)}, U_x^{(2)}\right), U_x^{(1)}, U_x^{(2)}, xxx\right)$$

$$U_z^{(zzz)} := \text{interp}\left(\text{cspline}\left(U_z^{(1)}, U_z^{(2)}\right), U_z^{(1)}, U_z^{(2)}, zzz\right)$$

ORIGIN:= C

$XX_0 := 0.00$

$ZZ_0 := 0.000$

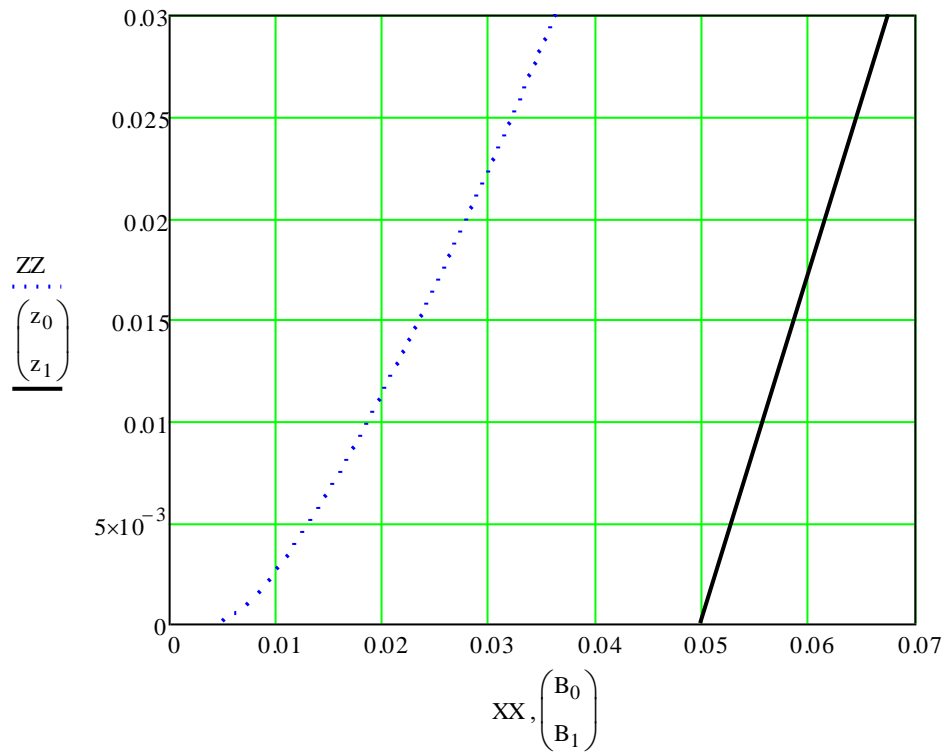
$$f(xxx, zzz) := \frac{U_x^{(xxx)}}{U_z^{(zzz)}}$$

$N := 100$

$$\Delta z := \frac{z_1}{N}$$

$$i := 1..N$$

$$ZZ_i := ZZ_{i-1} + \Delta z$$

$$XX_i := XX_{i-1} + f(XX_{i-1}, ZZ_{i-1}) \cdot \Delta z$$


$$f_t := 0.3$$

$$k := 33.0\%$$

$$\text{ORIGIN} := 1$$

$$\lambda_t := 0.95\%$$

$$D_e := 0.099\%$$

$$\beta := 0.0\%$$

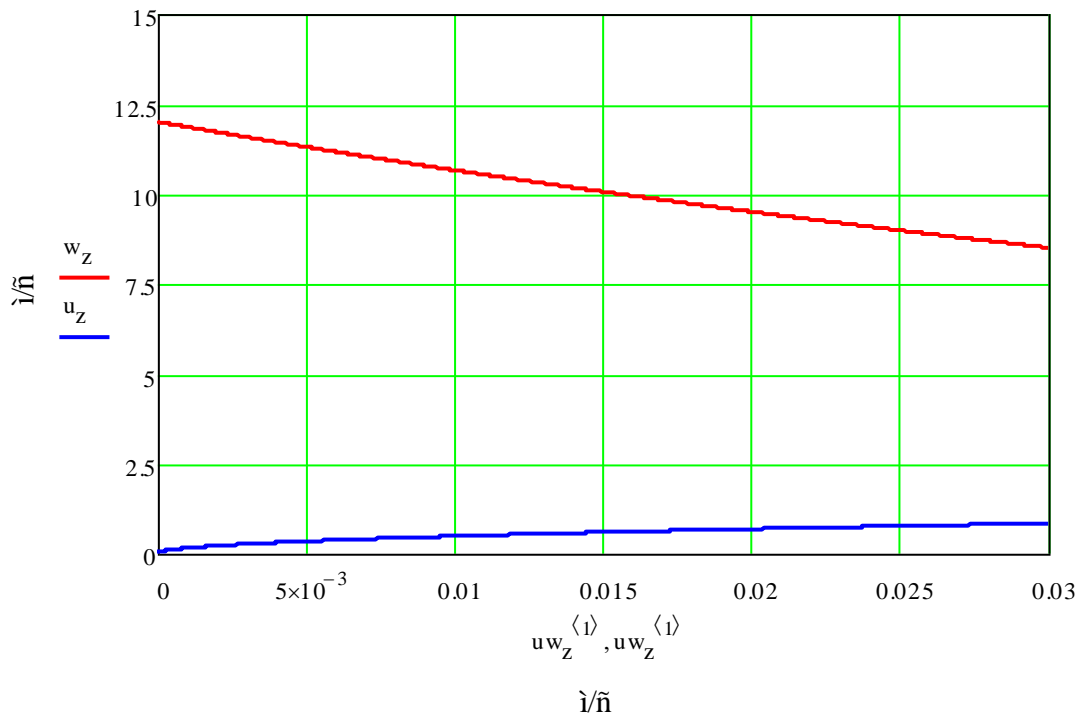
$$D_z(zzz, u) := \left[\begin{array}{c} \frac{\frac{\lambda_t \cdot (u_1)^2}{D_e \cdot 2} - \zeta \cdot k \cdot \frac{(u_1 - u_2)^2}{2}}{(1 - \beta) \cdot u_1} \\ -g \cdot \left(1 + \frac{f_t}{\sqrt{1 + \theta^2}} \right) - \zeta \cdot k \cdot \frac{(u_1 - u_2)^2}{2} \cdot \frac{\rho_g}{\rho_t} \\ \hline u_2 \end{array} \right]$$

$$u_0 := \begin{pmatrix} 12 \\ 0.001 \end{pmatrix}$$

$$uw_z := \text{Bulstoer}(u_0, z_1, z_2, 1000, D_z)$$

$$w_z := uw_z^{(2)}$$

$$u_z := uw_z^{(3)}$$



$$\tau_k := 1$$

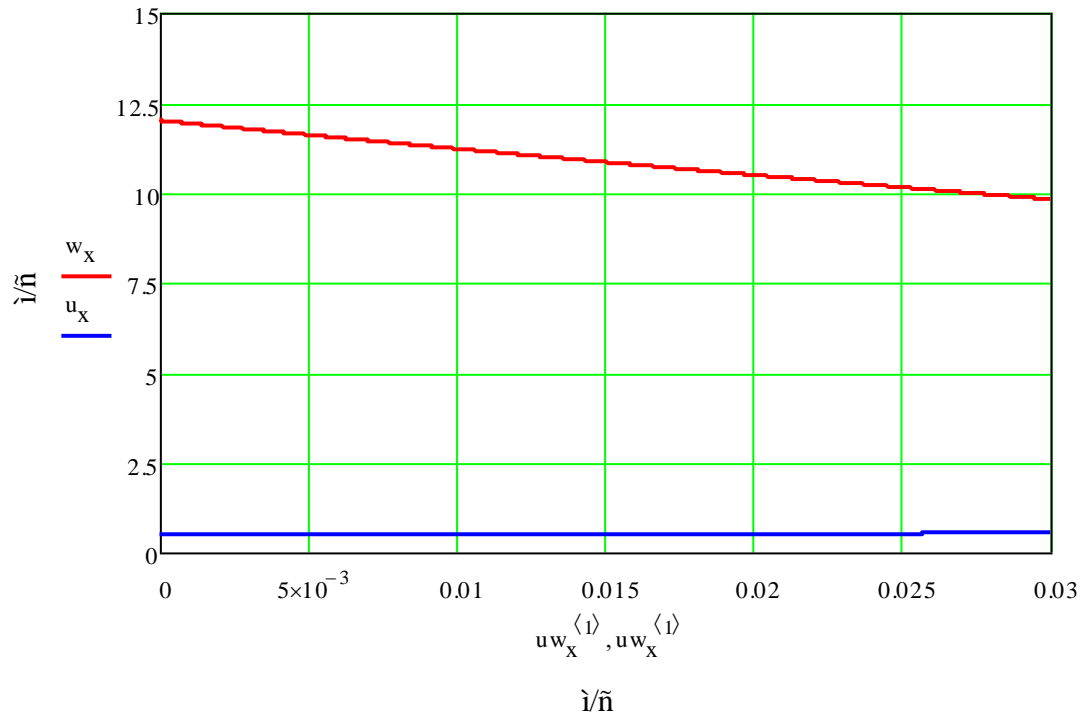
$$D_{xxxu} := \begin{bmatrix} \frac{-\zeta \cdot k \cdot (u_1 - u_2)^2}{(1 - \beta) \cdot u_1} \\ \frac{\zeta \cdot k \cdot \frac{(u_1 - u_2)^2}{2} \cdot \frac{\rho_g}{\rho_t} - 2 \cdot f_t \cdot \beta \cdot \frac{u_2}{\tau_k}}{u_2} \end{bmatrix}$$

$$u_0 := \begin{pmatrix} 12 \\ 0.5 \end{pmatrix}$$

$$uw_x := \text{Bulstoer}(u_0, z_1, z_2, 1000, D_x)$$

$$w_x := uw_x^{(2)}$$

$$u_x := uw_x^{(3)}$$



$$w_x(xxx) := \text{interp}\left(\text{cspline}\left(uw_x^{(i)}, w_x\right), uw_x^{(i)}, w_x, xxx\right)$$

$$w_z(zzz) := \text{interp}\left(\text{cspline}\left(uw_z^{(i)}, w_z\right), uw_z^{(i)}, w_z, zzz\right)$$

ORIGIN:= 0

XX₀ := 0.000

ZZ₀ := 0

$$f(xxx, zzz) := \frac{w_x(xxx)}{w_z(zzz)}$$

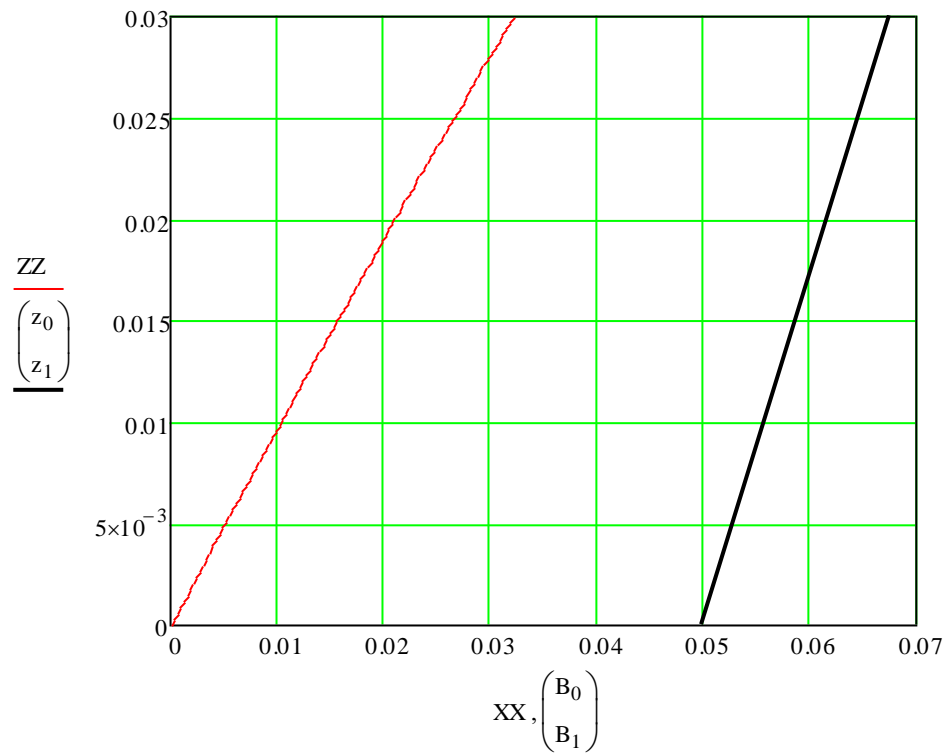
N := 100

$$\Delta z := \frac{z_1}{N}$$

$i := 1..N$

$ZZ_i := ZZ_{i-1} + \Delta z$

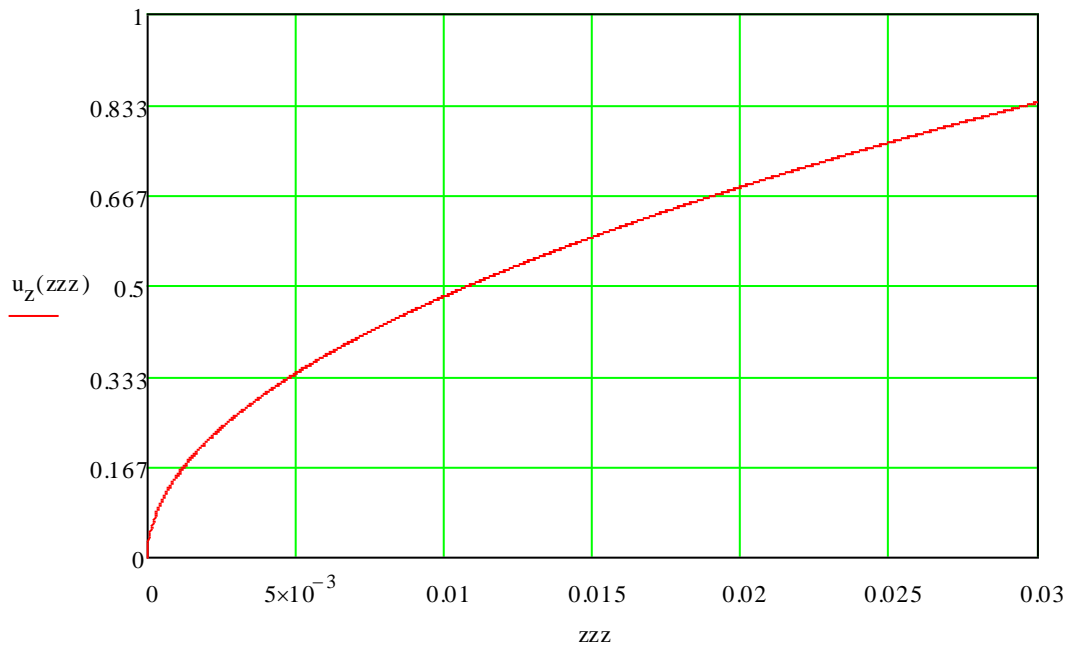
$XX_i := XX_{i-1} + f(XX_{i-1}, ZZ_{i-1}) \cdot \Delta z$



ORIGIN:= 1

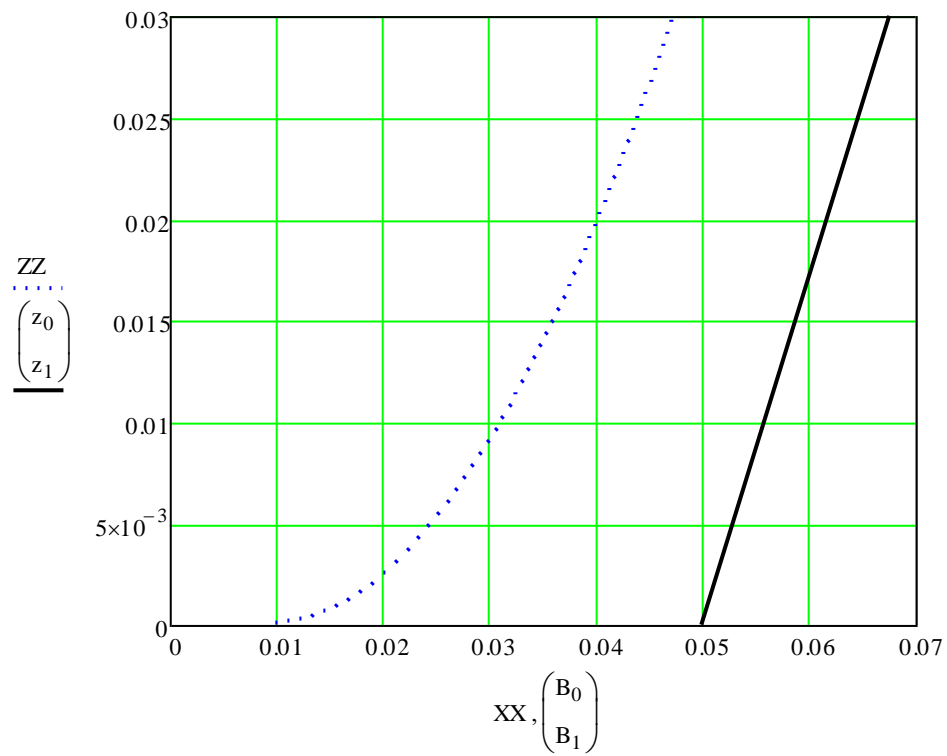
$u_x(XXX) := \text{interp}\left(\text{cspline}\left(uw_x^{(1)}, u_x\right), uw_x^{(1)}, u_x, XXX\right)$

$u_z(ZZZ) := \text{interp}\left(\text{cspline}\left(uw_z^{(1)}, u_z\right), uw_z^{(1)}, u_z, ZZZ\right)$



ORIGIN:= C

XX₀ := 0.01



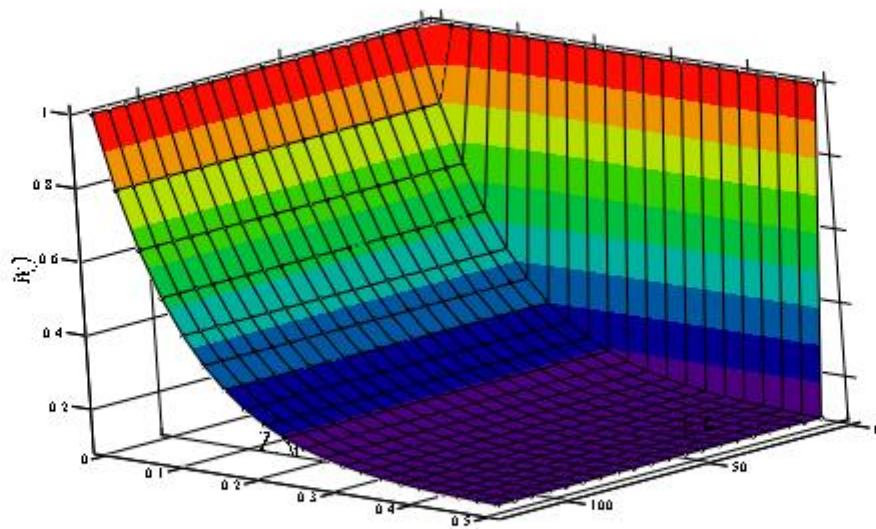
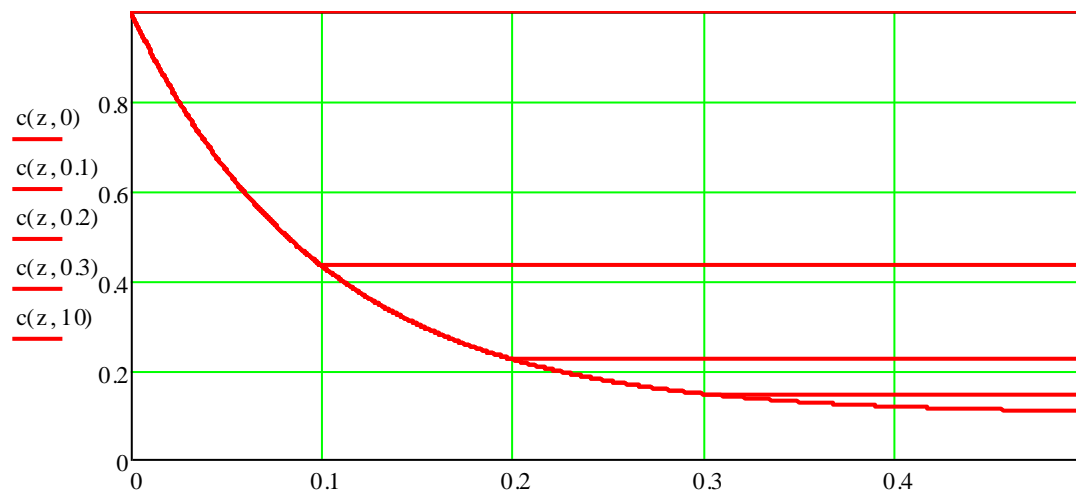
$$c_0 := 1$$

$$c_1 := 0.1$$

$$k := 10$$

$$u := 1$$

$$c(z,t) := c_1 + (c_0 - c_1) \cdot \left[e^{-\frac{k \cdot z}{u}} \cdot \Phi\left(t - \frac{z}{u}\right) + e^{-k \cdot t} \cdot \left(1 - \Phi\left(t - \frac{z}{u}\right)\right) \right]$$



ДОДАТОК Г

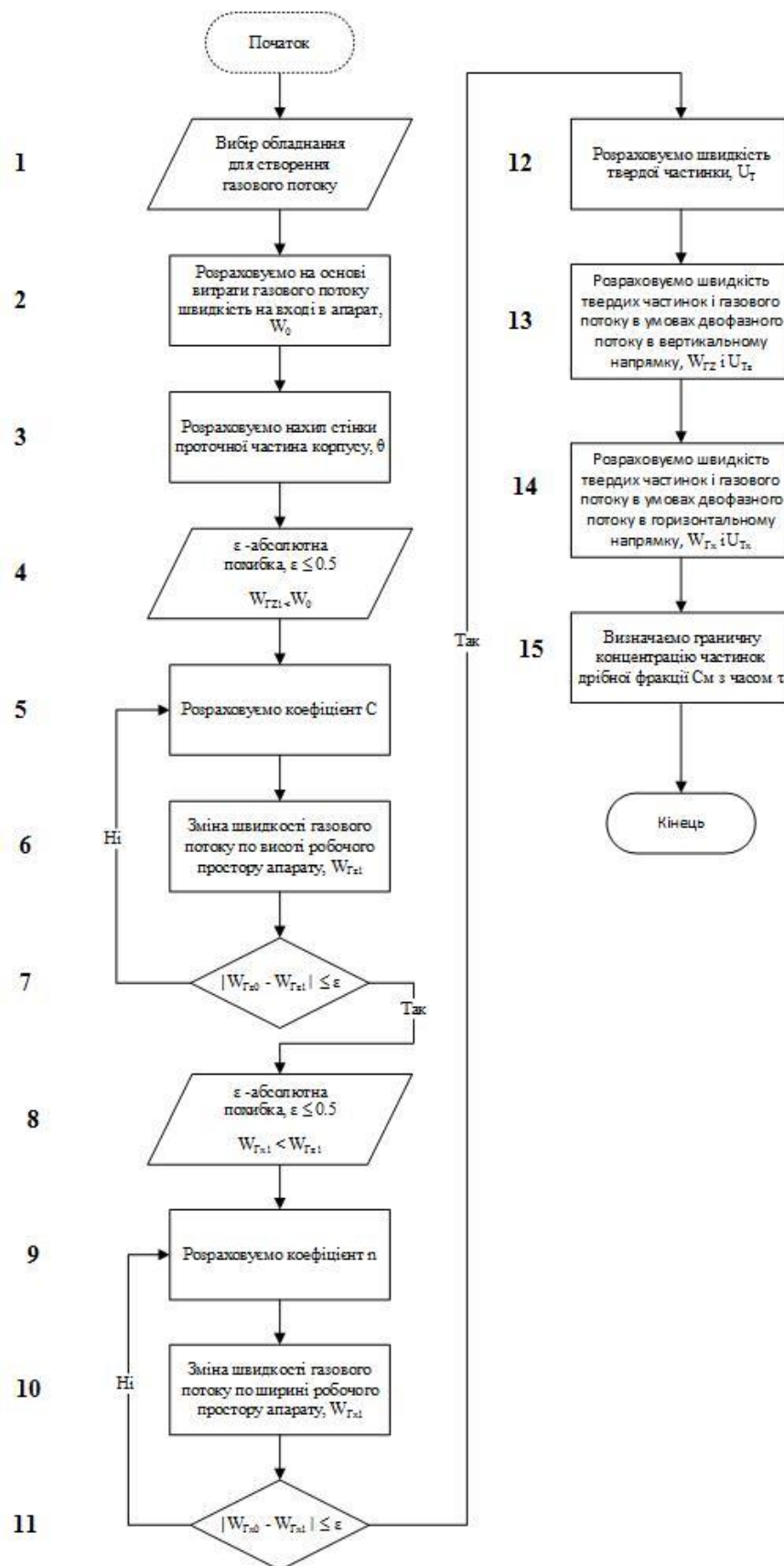


Рисунок В.1 – Блок-схема інженерного розрахунку пневмокласифікатора змінного перетину

ДОДАТОК Д

“СУМИФІТОФАРМАЦІЯ”
товариство з обмеженою відповідальністю

р/р 26002124725 в АБ «Укргазбанк»
м. Київ, МФО 320478, код 31397624,
інд. ном. 313976218190
св. № 200126310
url: www.fitofarm.com e-mail: info@fitofarm.com
тел./факс (0542) 780137



“СУМЫФИТОФАРМАЦИЯ”
общество с ограниченной ответственностью

р/с 26002124725 в АБ «Укргазбанк»
г. Киев, МФО 320478, код 31397624,
инд. ном. 313976218190
св. № 200126310
url: www.fitofarm.com e-mail: info@fitofarm.com
тел./факс (0542) 780137



Ю.В.Зюрин
2015 р.

АКТ
про використання результатів
кандидатської дисертаційної роботи Литвиненка А.В.

Комісія у складі: голова - головний інженер Єременко О.В., та члени комісії головний механік Бабак І.М., інженер по впровадженню техніки та технологій Товолжанський М.Ю. склали даний акт про те, що результати дисертаційної роботи Литвиненка А.В. «Класифікація та пневмозбагачення сипких сумішей у гравітаційному пневмокласифікаторі», представлені на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук, використані у виробничій діяльності ТОВ «Сумифітофармація» при вдосконаленні існуючого виробництва лікарської рослинної продукції, спецій та натуральних інгредієнтів у вигляді технічних пропозицій та практичних рекомендацій щодо запровадження сучасних технологій та нового високоефективного апаратурного оформлення для процесів класифікації дисперсних сумішей при переробці рослинної сировини.

Використання вказаних результатів дозволяє автоматизувати стадію сортування сировини, здійснити класифікацію дисперсних компонентів, а також підвищити якість отримуваних продуктів за рахунок зменшення долі компонентів у товарній фракції, що не відповідають вимогам стандартів та специфікацій.

Результати використані при наданні науково-консультаційних послуг за темою «Сучасні технології та обладнання для сепарації і класифікації дисперсних сумішей рослинної сировини» (договір №51.18-02.15.СП від 18 лютого 2015 р. на проведення науково-технічного консультування, замовник - ТОВ «Сумифітофармація», виконавець НДР - Сумський державний університет, кафедра процесів та обладнання хімічних і нафтопереробних виробництв). Здобувач виступав у якості відповідального виконавця.

Голова комісії

О.В. Єременко

Члени комісії

І.М. Бабак

Товолжанський

М.Ю.