

**ПОЛТАВСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ АГРАРНИЙ УНІВЕРСИТЕТ**  
**Факультет інженерно-технологічний**  
**Кафедра механічної та електричної інженерії**

Пояснювальна записка  
до кваліфікаційної роботи на здобуття ступеня вищої освіти  
*магістр*

на тему: «Удосконалення конструкції вібросепаратора для очищення зерна»

КРМ.133ГМмд\_23.48.000 ПЗ

Виконав: здобувач вищої освіти

за ОПП «*Машини і засоби механізації  
сільськогосподарського виробництва*»  
спеціальності *133 Галузеве машинобудування*  
ступеня вищої освіти «*магістерського*»  
групи 133ГМмд\_23  
ОЛЬШАНСЬКИЙ Микола

Керівник: докт. техн. наук, професор  
КОСТЕНКО Олена

Рецензент: к.т.н., доцент  
ЛЯШЕНКО Сергій

**Полтава – 2024 року**

## ВСТУП

**Актуальність теми.** Продукти харчування, вироблені із зерна пшениці, посідають суттєве місце в раціоні харчування населення нашої країни. Завдяки їм харчовий раціон забезпечується за калорійністю на 40%, білками - на 50%, вуглеводами - на 60%. Це пояснює вимоги до якості зерна за засміченістю, вологості та хлібопекарських властивостей. Очевидно, що не існує способів, що дають змогу випускати високоякісні та корисні харчові продукти з низькоякісної зернової сировини. Практично встановлено й економічно обґрунтовано, що простіше виробити якісну сировину, ніж намагатися усунути дефекти в процесі переробки некондиційної сировини [19].

Чистота зерна – один із найважливіших показників, що формують якість борошна і зернових продуктів. Тому питання вилучення із зерна сміттєвих домішок перебуває під пильною увагою і аграріїв, і переробників.

Аналіз наявних проблем дав змогу зробити висновки, що підтверджують актуальність роботи:

- підвищення врожайності зернових культур залежить від якості насіннєвого матеріалу та відсутності в ньому сторонніх домішок;
- зерно з підвищеною засміченістю знижує якість борошна, що використовується для виготовлення харчових продуктів і веде до зростання собівартості;
- розв'язання проблеми зменшення домішок у зерні можливе шляхом удосконалення процесів сепарування та використовуваного обладнання.

Тема роботи безпосередньо пов'язана з продовольчою безпекою держави, оскільки впливає з потреб галузі виробництва зерна та його переробки.

**Мета роботи** – підвищення ефективності очищення зерна від легких домішок шляхом модернізації конструкції вібросепаратора.

**Завдання** дослідження:

- провести аналіз обладнання, яке застосовується для видалення домішок із зерна;

- розробити теоретичні основи, що описують вібраційний рух частинок нижнього шару між рифлями опорної поверхні робочого елемента;
- створити конструкцію робочого елемента для вібросепаратора;
- експериментально встановити оптимальні параметри процесу сепарування;
- оцінити економічну ефективність запропонованої розробки.

**Об'єкт розробки** – конструкція вібросепаратора для очищення зерна.

**Предмет розробки** – залежності ефективності процесу сепарування та інтенсивності видалення легких домішок з нижнього шару від питомого навантаження, частоти коливань та кута нахилу робочого органу.

**Методи досліджень** – системний підхід, абстрактно-логічний метод, емпіричний метод, методи математичного моделювання, статистичний методи обробки експериментів.

**Наукова новизна дослідження**

**Новизна теоретичного дослідження**

Теоретично визначені режими руху частинок нижнього шару між суміжними рифлями за період коливань опорної поверхні, із яких раціональним для здійснення процесів сепарування є режим руху частинок нижнього шару – двостороннє ковзання з миттєвою зупинкою без пауз.

Розроблена конструкція робочого органу вібросепаратора, що дозволяє забезпечити ефективність видалення легких домішок з зерна пшениці не менше 80% та суттєво знизити на пневмоканал.

Розроблено конструкцію лотка пневмосепараторів, що дозволяє при продуктивності 7 т/год знизити навантаження на пневмоканал на 47%.

**На захист виносяться** такі питання:

Можливі режими руху частинок нижнього шару відносно опорної поверхні.

Раціональний режим руху частинок нижнього шару є – двостороннє ковзання з миттєвими зупинками.

Конструкторська розробка – конструкція пристрою для очищення зерна від легких домішок.

**Публікації:**

1. Ольшанський М.І., Костенко О.М., Дрожчана О.У. Огляд робіт в галузі вібраційного сепарування. Матеріали III Міжнародної науково-практичної Інтернет-конференції *Актуальні напрями та проблематика у технологіях вирошування продукції рослинництва* (м. Полтава 28 листопада 2024р.). Полтава: РВВ ПДАУ, 2024. С. 38-41.

2. Ольшанський М.І., Костенко О.М., Дрожчана О.У. Модель вібраційного переміщення частинок нижнього шару між суміжними ріфлями. Матеріали VII Всеукраїнської науково-практичної Інтернет-конференції *Проблеми та перспективи розвитку сільськогосподарського машинобудування* ( м. Полтава 10-11 грудня 2024 р.). Полтава: РВВ ПДАУ, 2024. С. 146-149.



## 1 АНАЛІЗ ІСНУЮЧИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

### 1.1 Огляд обладнання для очищення зерна від дрібних та легких домішок

До дрібних домішок відносять частинки зерноsumіші, які просіваються через отвори пробивних решіт зернових сепараторів. Наприклад, решета з прямокутними комірками 1,7x20 мм для зерна пшениці [2].

До легких домішок належать частинки зі швидкістю витання меншою, ніж зерна, що очищаються. Здебільшого це органічна домішка (зерна бур'янів рослин, частинки стебел і колосків), меншу частину становлять мінеральні частинки, такі як пил.

Очищення від легких домішок проводять на стадії повітряного сепарування висхідними повітряними потоками, коли легкі частинки захоплюються вгору і несуться в повітроочисні пристрої - циклони або фільтри. Зерна ж культури, що очищається, падають вниз під дією власної ваги.

Серед легких і важких домішок певна частка з огляду на їхню форму та розміри може бути віднесена до дрібних домішок.

Очищення від дрібних домішок на кінцевих стадіях проводять на вібраційних сепараторах. Процес очищення зерна пшениці від дрібних домішок складається з двох основних стадій – самосортування, завдяки якому частинки дрібної домішки досягають дна опорної поверхні та стадії просіювання частинок дрібної домішки, сконцентрованих у нижньому шарі зерноsumіші [2,6,12].

Оцінка ефективності процесу сепарування проводиться за технологічною і споживчою цінностями та повнотою вилучення домішки, яка могла б бути вилучена за даною ознакою. Оцінка технологічної цінності дає змогу оцінити досконалість процесу або технологічної машини, призначеної для розділення частинок за певними властивостями. Оцінка за споживчою цінністю відображає

вплив процесу на якість і вихід готового продукту. Домішки, що виділяються під час сепарування, поділяються на шкідливу, зернову та засмічену.

Процеси очищення зерна пшениці від дрібних і легких домішок здійснюють спільно або окремо завдяки компонуванню робочих органів (сита та повітряні канали) в окремі технологічні вузли або суміщенню їх в одному технологічному вузлу. Далі розглянемо існуючі технологічні машини, які застосовуються для очищення зерна пшениці [8,12].

*Ситовий сепаратор* [2,6,18]. Сито-повітряний вібросепаратор типу СПВ (рис.1.1) призначений для попереднього й остаточного очищення зернових і круп'яних культур на елеваторах, млинах, круп'яних і комбикормових заводах. Обробка продукту здійснюється в ситовому корпусі з відповідним набором сортувальних і підсівних сит. На рисунку 1.2 показано конструктивну та технологічну схему сепаратора типу СПВ.

Рисунок 1.1 – Вібросепаратор СПВ      Рисунок 1.2 – Конструктивна та технологічна схеми сепаратора типу СПВ

Сепаратор складається з рами 12 ситового корпусу, встановленого на пружинах 8. Коливальний рух ситовому корпусу надають два мотор-вібратори 5. Ситовий корпус має два яруси сит 3, 4, 6, 7 - сортувальні та підсівні.

Технологічний процес у сепараторі здійснюється таким чином: продукт, що підлягає очищенню, подається в приймально-розподільний пристрій, далі по системі похилих скатів 2 зерно направляється на сортувальні сита 3, 4, де відокремлюються великі домішки II, а зерно проходив надходить на підсівне сито. Очищене зерно виводиться сходом із підсівного сита 6, 7 і видаляється

через лоток із фартухом 10 (III). Дрібні домішки проходять просівного сита сепаратора збираються на днище і виводяться через патрубок IV.

Розмах коливань ситового корпусу регулюється в межах 3 - 6 мм за рахунок положення мас вібраторів. При числі коливань за хвилину 750 об/хв забезпечується відповідний режим переміщення продукту по ситі і виділення прохідних фракцій.

До цього типу так само належить ситовий сепаратор «Класіфайер» фірми «Бюлер».

До переваг вібросепараторів можна віднести використання як приводів мотор-вібраторів, що забезпечує простоту конструкції приводу.

Недоліками вібросепараторів можна вважати низьку ефективність виділення прохідної фракції, що в умовах сучасного виробництва хлібопродуктів перешкоджає його використанню як основного сепаратора.

Недоліками застосування мотор-вібраторів є маленьке значення амплітуди коливань, що негативно позначається на самосортуванні зернової суміші. Надання великих амплітуд можливе встановленням кінематичного приводу.

*Віброситовий сито-повітряний сепаратор* [2,6]. Представлений цілою низкою марок, серед яких можна виділити моделі Р1-АСК, СВ-6, БСХМ-16, ПАР (Чехія). На рисунку 1.3 представлено віброситовий сито-повітряний сепаратор ПАР. Ця технологічна машина об'єднує дві технологічні стадії очищення: стадію вібросепарування, що здійснюється на ситах і призначену для очищення від дрібних домішок, і стадію пневмосепарування, протягом якої із зерна виділяються легкі домішки.

Ситовий корпус 28 має два ряди сит: сортувальне та підсівне, які фіксуються в ньому за допомогою маховичків 17. Мотор-вібратори 7 встановлені на поворотній плиті. Приймальний патрубок 6 з'єднується з розподільною коробкою 2. На станині 1 на кронштейнах монтуються віброопори 27. Великі домішки виводяться через лоток 25, дрібні - через лоток у днище корпусу, а сід із підсівних сит / надходить у бункер 11 повітряного сепаратора. Віброток подає потік зерна в пневмосепарувальний канал 12, де видаляються

легкі домішки, які осідають у камері 14. Домішки III з машини видаляються за допомогою шнека і шлюзового затвора 16. Повітря з осадової камери вентилятором 13 подається знову в канал 12 (цикл замикається). Зерно II виводиться з повітряного сепаратора за допомогою бункерного пристрою 9 з протипідсмоктувальним клапаном. Амплітуда вібролотка регулюється для відповідної подачі потоку зерна в канал. Швидкість повітря в каналі регулюється похилою рухомою стінкою 23 і дросельною заслінкою 20. Для спостереження процесу пневмосепарації є вікна 21. Віброситовий сепаратор ПАР випускається трьох типорозмірів продуктивністю від 10 до 15 т/год. на млиновому очищенні і 40-60 т/год. - на елеваторному.

### Рисунок 1.3 – Віброситовий сито-повітряний сепаратор ПАР

До переваг цього типу сепараторів можна віднести високу ефективність відділення великих домішок, а також увагу, яку було приділено проблемі очищення сит, очищення проводять за допомогою гумових кульок. Загальні недоліки сепараторів полягають у відносно невисокій ефективності сепарування домішок при середніх величинах продуктивності, що обмежує його застосування як основного сепаратора. Так само можна відзначити невисоку амплітуду коливань робочого органу сепараторів, внаслідок чого ефективність самосортування, надалі просіювання домішок збільшується зі зростанням амплітуди коливань. Висока питома витрата повітря та велика частка очищення в питомій витраті енергії.

*Пневмосепарувальний пристрій.* Пневмосепарувальний пристрій УПС (рис. 1.4) із замкнутим циклом повітря призначений для очищення зерна

1 - основа віброживильника; 2 - вібрлоток; 3 - стойки; 4 - ексцентриковий коливатель; 5 - привідний електродвигун; 6, 14 - клинопасові передачі; 7- пневмосепаруючий канал; 8 - осаджувана камера; 9 - рециркуляційний канал; 10 - робоче колесо діаметрального вентилятора; 11- шнек; 12 – дроселююча заслінка; 13 - електродвигун вентилятора; 15 - контрпривід; 16 - вихідний патрубок

#### Рисунок 1.4 – Пневмосепаруючий пристрій УПС

пшениці, жита і круп'яних культур від аеровідокремлюваних домішок під час підготовки до помелу або лушення, а також для розділення продуктів лушення круп'яних культур.

Конструкції пневмосепарувальних пристроїв УПС-06, УПС-10, УПС-15 аналогічні і відрізняються тільки довжиною корпусу машини і, відповідно, шириною віброживильника.

Пневмосепарувальний пристрій (рис. 1.4) [2,6 ] являє собою збірно-зварну конструкцію і складається з віброживильника і повітряної частини. Повітряна частина пневмосепарувального пристрою являє собою конструкцію, в якій внутрішніми стінками і перегородками утворено вертикальний пневмосепарувальний канал 7, осадова камера 8 і рециркуляційний канал 9. У верхній частині осадової камери по її довжині вбудовано робоче колесо 10. У нижній частині розміщено шнек 11 для виведення відносів.

Під пневмосепарувальним каналом розташований вихідний патрубок 16 для виведення очищеного зерна з пристрою.

Технологічний процес пневмосепарувального пристрою здійснюється таким чином. Початкова суміш із ситового зерноочисного сепаратора СПВ-Н через приймальний патрубок віброживильника надходить на вібралоток 2, який за рахунок спрямованих коливань і рифленої поверхні днища розшаровує суміш і транспортує її до пневмосепарувального каналу. Під час розшарування суміші «легкі» аеровідокремлювані домішки розташовуються у верхньому шарі. Потрапляючи в пневмосепарувальний канал, зернова суміш під дією висхідного повітряного потоку розділяється на дві фракції залежно від аеродинамічних властивостей компонентів, що розділяються.

Повноцінне зерно виводиться з пристрою через вихідний патрубок 16. Виділені із зерна домішки захоплюються повітрям і несуться в осадову камеру 8, де під дією гравітаційних і відцентрових сил осідають і виводяться з пристрою шнеком 11.

Переваги – простота конструкції, хороша ергономіка, а також достатнє питоме навантаження, за необхідної ефективності виділення аеровідокремлюваних домішок із зерноsumіші.

Недоліками сепаратора є низька ефективність фракційного поділу та очищення зерна, відсутність попередньої підготовки матеріалу під час подавання в повітряну камеру і шиберів для регулювання та встановлення меж поділу оброблюваного матеріалу на фракції зерна та відходи. У роботі [12] розглядалася проблема розшарування суміші перед подачею її в пневмоканал установкою на гладку поверхню вібралотка макрошорсткуватої поверхні у вигляді рифлей, що підвищує ефект самосортування і тим самим знижуючи концентрацію легких домішок у нижніх шарах, що збільшувало ефективність роботи сепаратора.

Отже, з наведеного огляду процесів сепарування зернових сумішей доходимо таких висновків.

Існуюче технологічне обладнання, що застосовується для очищення зерна пшениці від домішок має такі недоліки:

- недостатньо висока технологічна ефективність очищення від дрібних домішок. Для підвищення ефективності процесу необхідно створити сприятливі умови для їх просіювання через ситову поверхню;

- легкі домішки, що витягуються повітряним потоком, рівномірно розподілені у шарі зерноsumіші, що знижує ефективність очищення. Для підвищення ефективності процесу необхідно забезпечити попереднє розшарування зерноsumіші перед подачею її у вертикальний пневмоканал.

Вирішити ці проблеми дозволить інтенсифікація процесу самосортування.

Здійснення процесів, що дають змогу отримати високу ефективність очищення зерна пшениці від дрібних і легких домішок вимагає вивчення робіт у галузі впливу вібрацій на сипучі тіла та ефекти самосортування і пошарового руху.

## 2 ТЕОРЕТИЧНІ ПОЛОЖЕННЯ

### 2.1 Модель вібраційного переміщення частинок нижнього шару між суміжними рифлями

Нехай горизонтально розташована шорстка площина здійснює зворотно-поступальні гармонійні коливання паралельно найбільшій зі сторін. На площині під кутом  $\alpha$  до напрямку коливань встановлено рифлі у вигляді прямокутних пластин (рис. 2.1). Пластини встановлені паралельно одна до одної.

Рисунок 2.1 – Опорна поверхня

Розглянемо елемент об'єму нижнього шару між суміжними пластинами (рис. 2.2). Будемо вважати його матеріальною точкою масою  $m$ , яка пов'язана силами сухого тертя з днищем робочого органу, з бічними поверхнями пластин і вище розміщеним шаром. Із площиною жорстко пов'язана система координат  $x, y, z$ , осі розташовані так, що вісь  $x$  спрямована вздовж пластин, вісь  $y$  – перпендикулярно пластинам, а вісь  $z$  - перпендикулярно площині опорної поверхні.

Під нижнім шаром мається на увазі шар, що лежить між рифлями опорної поверхні. Під верхнім - шар зерноsumіші, що лежить над рифлями опорної поверхні.

Рисунок 2.2 – Система сил, що діє на частинку нижнього шару

Як основне допущення вважатимемо, що контакт частинки нижнього шару з бічними поверхнями пластин відбувається без зазору і, отже, без ударів. При цьому внаслідок коливань робочого органу частинка під час руху між пластинами має поперемінно силовий контакт то з однією пластиною, то з іншою. Рух частинки розглянемо як суму переносного разом з опорною поверхнею і відносного руху вздовж пластин.

Опорна поверхня здійснює гармонійні поступальні коливання за законом [4,10]:

$$\left. \begin{aligned} S_n &= A \sin \omega t \\ V_n &= A \omega \cos \omega t \\ a_n &= -A \omega^2 \sin \omega t \end{aligned} \right\}, \quad (2.1)$$

де  $S_n$ ,  $V_n$ ,  $a_n$  – відповідно переміщення, швидкість і прискорення в переносному русі.

$P = -ma = mA\omega^2 \sin \omega t$  – сила інерції в переносному русі;

$N_1$  – нормальна реакція опорної поверхні робочого органу;

$N_2$  – нормальна реакція зі сторони бокової поверхні пластини, з якою частинка має силовий контакт;

$F_1 = N_1 f_1$  – сила опору об днище робочого органу, де  $f_1$  – наведений коефіцієнт опору здвигу частинки по днищу робочого органу;

$F_2 = N_2 f_2$  – сила опору при силовому контакті з боковою поверхнею пластин, де  $f_2$  – наведений коефіцієнт опору здвигу частинки об бокову поверхню пластини;

$F_3 = mg f_c$  – сила опору з боку шару, що знаходиться над рифлями, де  $f_c$  – наведений коефіцієнт опору здвигу вищого шару відносно нижчого, який рухається разом з робочим органом.

Сила тертя  $F_3$  спрямована проти відносної швидкості  $V_{н.ш.}$  нижнього шару відносно вище розміщеного (рис. 2.3). На рисунку зображено проекцію прийнятої моделі на площину робочого органу, де  $\dot{x}_{н.ш.}$  – переносна швидкість руху нижнього шару вздовж пластин, а  $V_{н.ш.}^p$  – рівнодіюча швидкість від  $V_{н.ш.}$  та  $\dot{x}_{н.ш.}$ . Напрямок швидкості  $V_{н.ш.}$  залежить від умов силового контакту та напрямку коливань опорної поверхні. На цьому рисунку сила тертя  $F_3$  утворює з напрямком коливань опорної поверхні кут  $\varepsilon$ , причому  $\varepsilon = \frac{\dot{x}_{н.ш.}}{V_{н.ш.}} \sin \gamma$ . Оскільки нижній шар зазнає додаткового гальмівного впливу з боку рифлів і опорної поверхні, то  $V_{н.ш.} \gg \dot{x}_{н.ш.}$ , таким чином можна вважати, що  $\sin \varepsilon \approx 0$ , а отже і  $\varepsilon = 0$ .

Рисунок 2.3 – Направлення сили тертя  $F_3$

У загальному випадку коефіцієнти опору частинки нижнього шару по днищу і об бічну поверхню пластини можуть бути різними, оскільки днище і пластини робочого органу можуть бути виготовлені з різних матеріалів і мати різну шорсткість.

Унаслідок гармонійності коливань робочого органу і симетрії в розташуванні рифлів існує симетрія сил опору відносному руху та переносних

сил інерції. У першому наближенні задаємося тим, що рух верхнього шару вважаємо гармонійним і нехтуємо зсувом фази щодо переносних коливань. При цьому, враховуємо, що амплітуда коливань верхнього шару в абсолютному русі суттєво менша, ніж амплітуда коливань робочого органу. Таким чином, можна вважати силу тертя з боку верхнього шару  $F_3 = mgf_c \text{sign} V_n$ .

Рух нижнього шару зерноsumіші можливий у всіх режимах, розглянутих для моделі матеріальної частинки в роботах І.І. Блехмана і В.В. Гортинським [7]. Слід зауважити, що найбільш раціональним є режим двостороннього ковзання з двома миттєвими зупинками, оскільки він дає змогу якнайповніше використовувати час перебування сепарованого матеріалу на Рух нижнього шару зерноsumіші можливий у всіх режимах, розглянутих на поверхні робочого органу, оскільки процеси самосортування та просіювання частинок відбуваються переважно при відносному русі частинок зерноsumіші.

## 2.2 Рух частинок нижнього шару між суміжними пластинами під час горизонтальних коливаннях горизонтальної опорної поверхні

Диференціальні рівняння відносного руху матеріальної точки нижнього шару масою  $m$  у проекціях на осі координат для випадку силового контакту матеріальної точки з правою пластиною мають вигляд:

$$m\ddot{x} = mA\omega^2 \sin \omega t \cos \gamma - F_1 - F_2 + F_3 \cos \gamma, \quad (2.2)$$

$$m\ddot{y} = mA\omega^2 \sin \omega t \sin \gamma - N_2 + F_3 \sin \gamma, \quad (2.3)$$

$$m\ddot{z} = N_1 - mg \quad (2.4)$$

Розглянемо можливі поєднання напрямку сили інерції переносного руху (силовий контакт із правою або лівою пластиною), знаку функції  $\text{sign} V_n = \text{sign} \cos \omega t$  (напряму сили тертя  $F_3$ ) і напряму відносного руху частинки вздовж осі  $x$  (напрямки сил тертя  $F_x$  і  $F_2$ ). Зауважимо, що за усіх можливих сполученнях напрямків зазначених сил рівняння (2.4) залишається незмінним, а в рівняннях

(2.2) і (2.3) на окремих інтервалах руху частинки змінюються знаки перед проекціями сил  $F_1, F_2, F_3$  і  $N_2$  на осі  $x$  та  $y$  [15].

Функція  $sign V_n = sign \cos \omega t$  в інтервалі зміни фазового кута  $\delta = \omega t$  від нуля до  $\frac{\pi}{2}$  дорівнює  $sign \cos \omega t = 1$ . Тоді в інтервалі зміни фазового кута  $0 \leq \delta \leq \frac{\pi}{2}$  і при силовому контакті з правою пластиною рівняння (2.2) та (2.3) матимуть вид:

$$m\ddot{x} = mA\omega^2 \sin \omega t \cos \gamma - N_1 f_1 - N_2 f_2 + mg f_c \cos \gamma, \quad 20 \quad (2.5)$$

$$m\ddot{y} = mA\omega^2 \sin \omega t \sin \gamma - N_2 + mg f_c \sin \gamma, \quad (2.6)$$

Рух частинки нижнього шару відбувається без підкидання, тому що мають місце горизонтальні коливання горизонтальної опорної поверхні. Отже,  $z = const$ , а  $\ddot{z} = 0$  і з рівняння (2.4) отримуємо вираз нормальної реакції  $N_1$ :

$$N_1 = mg \quad (2.7)$$

Оскільки рух частинки в напрямку, перпендикулярному пластині, неможливий, то  $y = const$ , а  $\ddot{y} = 0$ . Отже, з рівняння (2.6) можна отримати вираз сили нормального тиску  $N_2$ :

$$N_2 = mA\omega^2 \sin \omega t \sin \gamma + mg f_c \sin \gamma, \quad (2.8)$$

Підставимо вирази  $N_1$  і  $N_2$  відповідно з рівнянь (2.7) і (2.8) у рівняння (2.5), з урахуванням  $f_2 = tg\mu$ , де  $\mu$  - кут тертя, після перетворення отримаємо:

$$\ddot{x} = A\omega^2 \cdot \frac{\cos(\gamma+\mu)}{\cos\mu} \cdot \left[ \sin\omega t - \frac{gf_1 \cos\mu}{A\omega^2 \cos(\gamma+\mu)} + \frac{gf_c}{A\omega^2} \right]. \quad (2.9)$$

Позначимо

$$a_+^n = A\omega^2 \cdot \frac{\cos(\gamma+\mu)}{\cos\mu}, \quad (2.10)$$

$$Z_+^n = \frac{g}{A\omega^2} \cdot \left[ \frac{f_1 \cos\mu}{\cos(\gamma+\mu)} - f_c \right]. \quad (2.11)$$

Отримаємо

$$\ddot{x} = a_+^n \cdot \left( \sin \omega t - Z_+^n \right), \quad (2.12)$$

де  $Z_+^n$  і  $a_+^n$  – безрозмірний параметр опору і параметр, який має розмірність прискорення, які відповідають силовому контакту частинки з правою пластиною

при її відносному русі в позитивному напрямку вісі  $x$  у випадку, коли швидкість верхнього і нижнього шарів співспрямовані.

При  $\delta = \frac{\pi}{2}$  функція  $sign V_n = sign \cos \omega t$  змінює знак на протилежний, тобто  $sign \cos \omega t = -1$  в інтервалі зміни фазового кута  $\delta$  від  $\frac{\pi}{2}$  до  $\frac{3}{2}\pi$ .

Сила інерції  $P$  при цьому зберігає свій напрям до  $\delta = \pi$ , тобто частинка продовжує силовий контакт з правою пластиною. Відповідно, на інтервалі зміни фазового кута  $\frac{\pi}{2} \leq \delta \leq \pi$  диференціалі рівняння (2.2) і (2.3) відносного руху частинки в проєкціях на вісі  $x$  і  $y$  мають вигляд

$$m\ddot{x} = mA\omega^2 \sin \omega t \cos \gamma - mgf_1 - N_2 f_2 - mgf_c \cos \gamma, \quad (2.13)$$

$$m\ddot{y} = mA\omega^2 \sin \omega t \sin \gamma - N_2 - mgf_c \sin \gamma. \quad (2.14)$$

Так як  $y = const$  і  $\ddot{y} = 0$ , то із рівняння (2.14) знаходимо вираз сили нормального тиску  $N_2$

$$N_2 = mA\omega^2 \sin \omega t \sin \gamma - mgf_c \sin \gamma. \quad (2.15)$$

Підставимо вираз  $N_2$  в рівняння (2.13) і після перетворення отримаємо

$$\ddot{x} = A\omega^2 \cdot \frac{\cos(\gamma+\mu)}{\cos\mu} \cdot \left[ \sin\omega t - \frac{gf_1 \cos\mu}{A\omega^2 \cos(\gamma+\mu)} - \frac{gf_c}{A\omega^2} \right]. \quad (2.16)$$

Позначимо

$$a_{\pm}^n = A\omega^2 \cdot \frac{\cos(\gamma+\mu)}{\cos\mu}, \quad (2.17)$$

$$Z_{\pm}^n = \frac{g}{A\omega^2} \cdot \left[ \frac{f_1 \cos\mu}{\cos(\gamma+\mu)} + f_c \right]. \quad (2.18)$$

Отримаємо

$$\ddot{x} = a_{\pm}^n \cdot \left( \sin \omega t - Z_{\pm}^n \right), \quad (2.19)$$

де  $Z_{\pm}^n$  і  $a_{\pm}^n$  – безрозмірний параметр опору і параметр, який має розмірність прискорення, які відповідають силовому контакту частинки з правою пластиною при її відносному русі в позитивному напрямку вісі  $x$  у випадку, коли швидкість верхнього і нижнього шарів направлені протилежно.

Рівняння (2.12) описує рух частинки в позитивному напрямку осі  $x$  при її силовому контакті з правою пластиною в інтервалі зміни фазового кута від  $\delta_{1+}^n$  до

$\frac{\pi}{2}$ , а рівняння (2.19) – в інтервалі  $-\frac{\pi}{2} \leq \delta \leq \pi$ . У діапазоні зміни фазового кута від  $\pi$  до  $2\pi$  частинка має силовий контакт із лівою пластиною. Якщо в інтервалі  $-\frac{\pi}{2} \leq \delta \leq \pi$  частинка не зупиниться за рахунок впливу на неї сили тертя з боку вище розміщеного на неї сили тертя з боку вище розміщеного шару, то вона продовжуватиме рух у позитивному напрямку за силового контакту з лівою пластиною.

Диференціальні рівняння відносного руху частинки на інтервалі  $\frac{\pi}{2} \leq \delta \leq \pi$  при ковзанні в позитивному напрямку осі  $x$  при силовому контакті з лівою пластиною мають вигляд: у проекції на вісь  $x$  аналогічно рівнянню (2.13), а в проекції на вісь  $y$ :

$$m\ddot{y} = mA\omega^2 \sin \omega t \sin \gamma + N_2 - mgf_c \sin \gamma. \quad (2.20)$$

Із рівняння (2.20) отримаємо вираз нормальної реакції  $N_2$

$$N_2 = -mA\omega^2 \sin \omega t \sin \gamma + mgf_c \sin \gamma. \quad (2.21)$$

Підставляючи значення  $N_1$  і  $N_2$  відповідно з рівнянь (2.7) і (2.21) в рівняння (2.13), після перетворення отримаємо:

$$\ddot{x} = A\omega^2 \cdot \frac{\cos(\gamma-\mu)}{\cos\mu} \cdot \left[ \sin\omega t - \frac{gf_1 \cos\mu}{A\omega^2 \cos(\gamma-\mu)} - \frac{gf_c}{A\omega^2} \right]. \quad (2.22)$$

Позначимо

$$a_{\pm}^{\text{л}} = A\omega^2 \cdot \frac{\cos(\gamma-\mu)}{\cos\mu}, \quad (2.23)$$

$$Z_{\pm}^{\text{л}} = \frac{g}{A\omega^2} \cdot \left[ \frac{f_1 \cos\mu}{\cos(\gamma-\mu)} + f_c \right]. \quad (2.24)$$

Отримаємо

$$\ddot{x} = a_{\pm}^{\text{л}} \cdot \left( \sin \omega t - Z_{\pm}^{\text{л}} \right), \quad (2.25)$$

де  $Z_{\pm}^{\text{л}}$  і  $a_{\pm}^{\text{л}}$  – безрозмірний параметр опору і параметр, який має розмірність прискорення, які відповідають силовому контакту частинки з лівою пластиною при її відносному русі в позитивному напрямку вісі  $x$  у випадку, коли швидкість верхнього і нижнього шарів направлені протилежно.

Рівняння (2.25) описує рух частинки в позитивному напрямку осі  $x$  при її силовому контакті з лівою пластиною в діапазоні зміни фазового кута від  $\pi$  до

$\delta_{2+}^{\text{л}}$  ( $\delta_{2+}^{\text{л}}$  - фазовий кут закінчення руху частинки в позитивному напрямку осі  $x$  при силовому контакті з лівою пластиною).

Після зупинки частинка може почати рух у негативному напрямку осі  $x$  при силовому контакті з лівою пластиною.

Диференціальні рівняння відносного руху частинки в проекціях на осі  $x$  та  $y$  мають вигляд: у проекції на вісь  $y$  аналогічно рівнянню (2.20), а на вісь  $x$ :

$$m\ddot{x} = mA\omega^2 \sin \omega t \cos \gamma + mgf_1 + N_2 f_2 - mgf_c \cos \gamma, \quad (2.26)$$

У цьому випадку нормальна реакція  $N_2$  визначається за рівнянням (2.21). Рівняння (2.26) після підстановки в нього  $N_2$ , перетворень і прийнятих позначень, приводиться до виду:

$$\ddot{x} = a_{-}^{\text{л}} \cdot (\sin \omega t - Z_{-}^{\text{л}}), \quad (2.27)$$

$$a_{-}^{\text{л}} = A\omega^2 \cdot \frac{\cos(\gamma+\mu)}{\cos\mu}, \quad (2.28)$$

$$Z_{-}^{\text{л}} = \frac{g}{A\omega^2} \cdot \left[ \frac{f_1 \cos\mu}{\cos(\gamma+\mu)} - f_c \right]. \quad (2.29)$$

де  $Z_{-}^{\text{л}}$  і  $a_{-}^{\text{л}}$  – безрозмірний параметр опору і параметр, який має розмірність прискорення, які відповідають силовому контакту частинки з лівою пластиною при її відносному русі в негативному напрямку вісі  $x$  у випадку, коли швидкість верхнього і нижнього шарів направлені протилежно.

Рівняння (2.29) описує рух частинки в негативному напрямку осі  $x$  під час її силового контакту з лівою пластиною в інтервалі зміни фазового кута від початку ковзання в негативному напрямку до  $\frac{3}{2}\pi$ .

У діапазоні зміни фазового кута  $\delta$  від  $\frac{3}{2}\pi$  до  $2\pi$  диференціальні рівняння відносного руху частинки в негативному напрямку осі  $x$  мають вид:

$$m\ddot{x} = mA\omega^2 \sin \omega t \cos \gamma + mgf_1 + N_2 f_2 + mgf_c \cos \gamma, \quad (2.30)$$

$$m\ddot{y} = mA\omega^2 \sin \omega t \sin \gamma + N_2 + mgf_c \sin \gamma. \quad (2.31)$$

Нормальна реакція  $N_2$  може бути визначена із рівняння

$$N_2 = -mgf_c \sin \gamma - mA\omega^2 \sin \omega t \sin \gamma \quad (2.32)$$

Рівняння (2.30), після підстановки в нього  $N_2$ , перетворень і прийнятих позначень, приводиться до виду:

$$\ddot{x} = a_{+}^l \cdot \left( \sin \omega t - Z_{+}^l \right), \quad (2.33)$$

де

$$a_{+}^l = A\omega^2 \cdot \frac{\cos(\gamma+\mu)}{\cos\mu}, \quad (2.34)$$

$$Z_{+}^l = -\frac{g}{A\omega^2} \cdot \left[ \frac{f_1 \cos\mu}{\cos(\gamma+\mu)} + f_c \right]. \quad (2.35)$$

де  $Z_{+}^l$  і  $a_{+}^l$  – безрозмірний параметр опору і параметр, який має розмірність прискорення, які відповідають силовому контакту частинки з лівою пластиною при її відносному русі в негативному напрямку вісі  $x$  у випадку, коли швидкість верхнього і нижнього шарів співспрямовані.

При  $2\pi < \delta < \frac{5}{2}\pi$  частинка матиме силовий контакт із правою пластиною і може продовжувати ковзання в негативному напрямку осі  $x$ .

Диференціальні рівняння відносного руху частинки в проекціях на осі  $x$  та  $y$  мають відповідно вигляд: рівняння (2.30) і рівняння (2.6).

Нормальна реакція  $N_2$  може бути визначена за рівнянням (2.8). Рівняння (2.30) приводиться до вигляду:

$$\ddot{x} = a_{+}^n \cdot \left( \sin \omega t - Z_{+}^n \right), \quad (2.36)$$

де

$$a_{+}^n = A\omega^2 \cdot \frac{\cos(\gamma-\mu)}{\cos\mu}, \quad (2.37)$$

$$Z_{+}^n = -\frac{g}{A\omega^2} \cdot \left[ \frac{f_1 \cos\mu}{\cos(\gamma-\mu)} + f_c \right]. \quad (2.38)$$

де  $Z_{+}^n$  і  $a_{+}^n$  – безрозмірний параметр опору і параметр, який має розмірність прискорення, які відповідають силовому контакту частинки з правою пластиною при її відносному русі в негативному напрямку осі  $x$  у випадку, коли швидкість верхнього і нижнього шарів співспрямовані.

Узагальнене рівняння відносного руху частинки вздовж осі  $x$  (уздовж пластин) за можливих сполучень напрямку сили інерції переносного руху, знаку функції  $sign V_n = sign \cos \cot$  і напрямку відносного руху частинки може бути представлено виразом:

$$\ddot{x} = a \cdot (\sin \omega t - Z), \quad (2.39)$$

$$\text{де } a = \begin{cases} a_+^n = A\omega^2 \cdot \frac{\cos(\gamma+\mu)}{\cos\mu} \text{ при } \delta_{1+}^n \leq \delta \leq \frac{\pi}{2} \\ a_+^n = A\omega^2 \cdot \frac{\cos(\gamma+\mu)}{\cos\mu} \text{ при } \frac{\pi}{2} \leq \delta \leq \pi \\ a_+^l = A\omega^2 \cdot \frac{\cos(\gamma-\mu)}{\cos\mu} \text{ при } \pi \leq \delta \leq \delta_{2+}^l \\ a_-^l = A\omega^2 \cdot \frac{\cos(\gamma+\mu)}{\cos\mu} \text{ при } \delta_{1-}^l \leq \delta \leq \frac{3}{2}\pi \\ a_+^l = A\omega^2 \cdot \frac{\cos(\gamma+\mu)}{\cos\mu} \text{ при } \frac{3}{2}\pi \leq \delta \leq 2\pi \\ a_+^n = A\omega^2 \cdot \frac{\cos(\gamma-\mu)}{\cos\mu} \text{ при } 2\pi \leq \delta \leq \delta_{2-}^n \end{cases} \quad (2.40)$$

$$Z = \begin{cases} Z_+^n = \frac{g}{A\omega^2} \cdot \left[ \frac{f_1 \cos\mu}{\cos(\gamma+\mu)} - f_c \right] \text{ при } \delta_{1+}^n \leq \delta \leq \frac{\pi}{2} \\ Z_+^n = \frac{g}{A\omega^2} \cdot \left[ \frac{f_1 \cos\mu}{\cos(\gamma+\mu)} + f_c \right] \text{ при } \frac{\pi}{2} \leq \delta \leq \pi \\ Z_+^l = \frac{g}{A\omega^2} \cdot \left[ \frac{f_1 \cos\mu}{\cos(\gamma-\mu)} + f_c \right] \text{ при } \pi \leq \delta \leq \delta_{2+}^l \\ Z_-^l = \frac{g}{A\omega^2} \cdot \left[ \frac{f_1 \cos\mu}{\cos(\gamma+\mu)} - f_c \right] \text{ при } \delta_{1-}^l \leq \delta \leq \frac{3}{2}\pi \\ Z_+^l = -\frac{g}{A\omega^2} \cdot \left[ \frac{f_1 \cos\mu}{\cos(\gamma+\mu)} + f_c \right] \text{ при } \frac{3}{2}\pi \leq \delta \leq 2\pi \\ Z_+^n = -\frac{g}{A\omega^2} \cdot \left[ \frac{f_1 \cos\mu}{\cos(\gamma-\mu)} + f_c \right] \text{ при } 2\pi \leq \delta \leq \delta_{2-}^n \end{cases} \quad (2.41)$$

де  $\delta_{1+}^n$  – фазовий кут ковзання частинки в позитивному напрямку вісі  $x$  при силовому контакті з правою пластиною;

$\delta_{2+}^l$  – фазовий кут ковзання частинки в позитивному напрямку вісі  $x$  при силовому контакті з лівою пластиною;

$\delta_{1-}^l$  – фазовий кут ковзання частинки в негативному напрямку вісі  $x$  при силовому контакті з лівою пластиною;

$\delta_{2-}^n$  – фазовий кут ковзання частинки в негативному напрямку вісі  $x$  при силовому контакті з правою пластиною.

З рівнянь (2.41) видно, що абсолютні значення безрозмірного параметра  $Z$  опору попарно дорівнюють одне одному на різних інтервалах ковзання частинки в позитивному й негативному напрямках осі  $x$  при силовому контакті з правою і лівою пластинами. Тобто  $Z_+^n = |Z_-^l|$ ,  $Z_+^n = |Z_+^l|$  і  $Z_-^l = |Z_+^n|$ .

З рівнянь (2.40) і (2.41) видно, що за рівності параметрів  $Z$  виявляються рівними і параметри  $a$ . Отже, під час коливань опорної поверхні з прискоренням, достатнім для відносного руху частинки між пластинами, остання матиме однакові за абсолютною величиною переміщення у позитивному та негативному напрямках осі  $x$ . Тобто, у випадку, що розглядається, спрямованого

вібропереміщення частинки не буде. Очевидно, що цей випадок не становить практичного інтересу з погляду здійснення процесу сепарування, оскільки при цьому не забезпечується безперервність процесу (відсутнє транспортування продукту по робочому органу).

Відсутність спрямованого вібропереміщення частинки можна пояснити симетрією рушійних сил і сил опору її відносному руху. Однак розв'язання задачі становить інтерес із погляду подальшого розвитку теорії вібраційного переміщення, а також, що не менш важливо, дає змогу оцінити вплив кута у орієнтації пластин до напрямку коливань опорної поверхні на можливість та інтенсивність руху частинок нижнього шару між пластинами.

На графіку (рис. 2.4) представлено залежність безрозмірних параметрів  $Z$  від кута  $\gamma$  встановлення пластин для одного з поєднань реальних кінематичних і настановних параметрів коливної опорної поверхні, що коливається:  $A = 40$  мм;  $n = 180$  кол/хв.;  $f_1 = 0,4$ ;  $f_2 = 0,35$ ;  $f_c = 0,5$ .

Як видно з графіка (рис. 2.4) і рівнянь (2.41)  $Z_{-}^n > Z_{+}^n$ . Це співвідношення справедливо для всіх значень кута  $\gamma$  орієнтації пластин, а співвідношення між параметрами  $Z_{+}^n < Z_{-}^n$  залежить від кута установки пластин. В області малих значень кута орієнтації пластин  $Z_{-}^n > Z_{+}^n$ . З збільшенням кута  $\gamma$  різниця між значеннями безрозмірних параметрів  $Z_{-}^n > Z_{+}^n$  зменшується. Існує область значень кута орієнтації пластин, при якій  $Z_{-}^n > Z_{+}^n$ .

Варто зауважити, що в даному випадку, при  $Z_{+}^n > 1$ , не виконуються умови початку ковзання частинки в кожному з напрямків, тобто в цьому разі відсутній рух частинки щодо опорної поверхні між суміжними пластинами. Область допустимих значень кута орієнтації  $\gamma$  пластин для розглянутого на рисунку 2.4 (табл. А.1) випадку обмежена пунктирною лінією, яка відповідає умові  $Z_{+}^n = 1$ .

Рисунок 2.4 – Залежність параметра  $Z$  від кута установки пластин  $\gamma$  при  $A = 40$  мм,  $n = 180$  кол/хв.

Зі співвідношень між значеннями безрозмірного параметра  $z$  опору відносному руху частинки впливає, що частинка рухається або в режимі двостороннього ковзання з двома миттєвими зупинками, або в режимі двостороннього ковзання з двома паузами. Відмінністю цих режимів є наявність у русі частинки в кожному з напрямків осі  $x$  трьох підінтервалів ковзання з різними значеннями безрозмірного параметра  $Z$  і параметра  $a$ . Під час руху частинки в режимі двостороннього ковзання з двома миттєвими зупинками частинка має різні значення безрозмірного параметра має по три підінтервали ковзання в кожному з напрямків осі  $x$ . Під час руху з паузами частинка може мати по два або по три підінтервали ковзання в кожному з напрямків.

Рух частинки в позитивному напрямку осі  $x$  може розпочатися, якщо  $\ddot{x} \geq 0$ , тобто за умови  $Z_+^n < 1$ . Умова  $Z_+^n < 1$  є умовою існування відносного руху частинки між суміжними пластинами.

Усталений режим руху визначається методом послідовних наближень. Для чого, задаючись початковими умовами, визначаються фазові кути початку і закінчення руху частинки в кожному з напрямків. Після чого, шляхом коригування початкових умов, відбувається вихід на усталений режим або наближення до нього з достатнім ступенем точності.

### 2.3. Рух частинок нижнього шару між суміжними пластинами при похилих коливаннях похилої опорної поверхні

Розглянемо випадок руху частинки нижнього шару при похилих коливаннях похилої опорної поверхні.

Опорна поверхня (рис. 2.5) нахилена до горизонталі під кутом  $\alpha$  і робить гармонійні коливання вздовж лінії найбільшого схилу. Напрямок коливань становить із площиною опорної поверхні кут  $\beta$ . Пластини встановлені так, що утворюють з напрямом коливань кут  $\gamma$ .

Рисунок 2.5 – Система сил, що діють на частинку нижнього шару

Для зручності подальших міркувань запишемо вирази проєкцій сил, що діють на частинку, на осі координат. Проєкції сили тяжіння:  $mg \sin\alpha \cos\gamma$  на вісь  $x$ ;  $mg \sin\alpha \sin\gamma$  на вісь  $y$ ;  $-mg \cos\alpha$  на вісь  $z$ . Сили інерції:  $P_x = P \cos\beta \cos\gamma$ ;  $P_y = P \cos\beta \sin\gamma$ ;  $P_z = P \sin\beta$ . Проєкції сили тертя:  $F_3 = mgf_c$ : на вісь  $x - F_3 \cos\gamma$  при  $0 \leq \delta \leq \frac{\pi}{2}$  та  $\frac{3\pi}{2} \leq \delta \leq \frac{5\pi}{2}$ ,  $-F_3 \cos\gamma$  при  $\frac{\pi}{2} \leq \delta \leq \frac{3\pi}{2}$ ; на вісь  $y - F_3 \sin\gamma$  при  $0 \leq \delta \leq \frac{\pi}{2}$  і  $\frac{3\pi}{2} \leq \delta \leq \frac{5\pi}{2}$ ,  $-F_3 \sin\gamma$  при  $\frac{\pi}{2} \leq \delta \leq \frac{3\pi}{2}$ . Сила нормального тиску  $N_2$  проєктується на вісь  $y$  зі знаком мінус при  $0 \leq \delta \leq \pi$  і  $2\pi \leq \delta \leq \frac{5\pi}{2}$ , зі знаком плюс при  $\pi \leq \delta \leq 2\pi$ . Сили опору  $F_1$  та  $F_2$  проєктуються на вісь  $x$  зі знаком мінус

при ковзанні частинки у позитивному напрямку осі  $x$  та зі знаком плюс при ковзанні в негативному напрямі. Відповідно до прийнятої схеми частинка має силовий контакт з правою пластиною при  $0 \leq \delta \leq \pi$  і  $2\pi \leq \delta \leq \frac{5\pi}{2}$ , з лівою – при  $\pi \leq \delta \leq 2\pi$ .

Диференціальні рівняння відносного руху частинки у проекціях на осі координат для випадку ковзання частинки у позитивному напрямку осі  $x$  при її силовому контакті з правою пластиною [4].

$$m\ddot{x} = mA\omega^2 \sin \omega t \cos \beta \cos \gamma + mg \sin \alpha - F_1 - F_2 + F_3 \cos \gamma, \quad (2.42)$$

$$m\ddot{y} = mA\omega^2 \sin \omega t \cos \beta \sin \gamma + mg \sin \alpha \sin \gamma - N_2 + F_3 \sin \gamma \quad (2.43)$$

$$m\ddot{z} = mA\omega^2 \sin \omega t \sin \beta - mg \cos \alpha + N_1. \quad (2.44)$$

Розглянемо рух частинки без підкидання, тому що при русі з підкиданням порушується процес самосортування, що не представляє практичного інтересу до процесів сепарування. Тоді  $z = \text{const}$  та  $\ddot{z} = 0$ , що дозволяє з рівняння (2.44) знайти силу нормального тиску  $N_1$ :

$$N_1 = mg \cos \alpha - mA\omega^2 \sin \omega t \sin \beta. \quad (2.45)$$

Так як рух частинки між пластинами в напрямленні осі  $y$  відсутній, тобто  $y = \text{const}$  та  $\ddot{y} = 0$ , то з рівняння (2.43) визначаємо силу нормального тиску  $N_2$ :

$$N_2 = mA\omega^2 \sin \omega t \cos \beta \sin \gamma + mg \sin \alpha \sin \gamma + F_3 \sin \gamma \quad (2.46)$$

Підставляючи значення  $N_1$  та  $N_2$  з рівнянь (2.44) і (2.46) до рівняння (2.42), враховуючи прийняті позначення, після перетворень рівняння (2.42) має вид:

$$\ddot{x} = a_+^n \cdot \left( \sin \delta - \frac{Z_+^n}{+} \right), \quad (2.47)$$

$$\text{де} \quad a_+^n = A\omega^2 \cdot \frac{f_1 \sin \beta \cos \mu + \cos \beta \cos(\gamma + \mu)}{\cos \mu}, \quad (2.48)$$

$$\frac{Z_+^n}{+} = \frac{g}{A\omega^2} \cdot \frac{f_1 \cos \alpha \cos \mu - \cos(\gamma + \mu) \cdot (\sin \alpha + f_c)}{f_1 \cos \mu \cos \beta + \cos(\gamma + \mu)} \quad (2.49)$$

Диференціальні рівняння відносного руху частки у проекціях на осі координат  $x$  та  $y$  при її ковзанні у позитивному напрямку осі  $x$  на інтервалі зміни фазового кута від  $\frac{\pi}{2}$  до  $\pi$  мають вид:

$$m\ddot{x} = mA\omega^2 \sin \omega t \cos \beta \cos \gamma + mg \sin \alpha \cos \gamma - F_1 - F_2 - F_3 \cos \gamma, \quad (2.50)$$

$$m\ddot{y} = mA\omega^2 \sin \omega t \cos \beta \sin \gamma + mg \sin \alpha \sin \gamma - N_2 - F_3 \sin \gamma. \quad (2.51)$$

Диференціальне рівняння відносного руху частки у проекції на вісь  $z$  не змінює свого виду протягом усього періоду коливань опорної поверхні. Отже, вираз сили нормального тиску  $N_1$  залишається незмінним за весь період коливань опорної поверхні та визначається з рівняння (2.45).

Сила нормального тиску  $N_2$  може бути визначена з рівняння (2.51):

$$N_2 = mA\omega^2 \sin \omega t \cos \beta \sin \gamma + mg \sin \alpha \sin \gamma - F_3 \sin \gamma \quad (2.52)$$

Після перетворень рівняння (2.51) приводимо до виду:

$$\ddot{x} = a_{\pm}^n \cdot (\sin \delta - Z_{\pm}^n), \quad (2.53)$$

де 
$$a_{\pm}^n = A\omega^2 \cdot \frac{f_1 \sin \beta \cos \mu + \cos(\gamma + \mu) \cdot \cos \beta}{\cos \mu}, \quad (2.54)$$

$$Z_{\pm}^n = \frac{g}{A\omega^2} \cdot \frac{f_1 \cos \alpha \cos \mu - \cos(\gamma + \mu) \cdot (\sin \alpha - f_c)}{f_1 \cos \mu \sin \beta + \cos(\gamma + \mu) \cdot \cos \beta} \quad (2.55)$$

На інтервалі зміни фазового кута від  $\pi$  до  $\frac{3\pi}{2}$  диференціальне рівняння відносного руху частинки в позитивному напрямку осі  $x$  в проекції на вісь  $x$  має вид рівняння (2.50), а в проекції на вісь  $y$  вид:

$$m\ddot{y} = mA\omega^2 \sin \omega t \cos \beta \sin \gamma + mg \sin \alpha \sin \gamma + N_2 - F_3 \sin \gamma \quad (2.56)$$

З рівняння (2.56) отримуємо вираз сили нормального тиску  $N_2$ :

$$N_2 = F_3 \sin \gamma - mg \sin \alpha \sin \gamma - mA\omega^2 \sin \omega t \cos \beta \sin \gamma \quad (2.57)$$

Після відповідних підстановок та перетворень рівняння (2.50) має вид:

$$\ddot{x} = a_{\pm}^l \cdot (\sin \delta - Z_{\pm}^l), \quad (2.58)$$

де 
$$a_{\pm}^l = A\omega^2 \cdot \frac{f_1 \sin \beta \cos \mu + \cos(\gamma - \mu) \cdot \cos \beta}{\cos \mu}, \quad (2.59)$$

$$Z_{\pm}^l = \frac{g}{A\omega^2} \cdot \frac{f_1 \cos \alpha \cos \mu + \cos(\gamma - \mu) \cdot (f_c - \sin \alpha)}{f_1 \sin \beta \cos \mu + \cos(\gamma - \mu) \cdot \cos \beta} \quad (2.60)$$

На інтервалі зміни фазового кута від  $\pi$  до  $\frac{3\pi}{2}$  при ковзанні частинки у негативному напрямку осі  $x$  диференціальне рівняння відносного руху в проекції на вісь  $y$  має вид рівняння (2.56), а в проекції на вісь  $x$  має вид:

$$m\ddot{x} = mA\omega^2 \sin \omega t \cos \beta \cos \gamma + mg \sin \alpha \cos \gamma + F_1 + F_2 - F_3 \cos \gamma, \quad (2.61)$$

Сила  $N_2$  може бути визначена із рівняння (2.57). Після відповідних підстановок та перетворень наводимо рівняння (2.61) до виду;

$$\ddot{x} = a_{-}^{\perp} \cdot (\sin \delta - Z_{-}^{\perp}), \quad (2.62)$$

$$\text{де} \quad a_{-}^{\perp} = A\omega^2 \cdot \frac{\cos(\gamma+\mu) \cdot \cos\beta - f_1 \sin\beta \cos\mu}{\cos\mu}, \quad (2.63)$$

$$Z_{-}^{\perp} = \frac{g}{A\omega^2} \cdot \frac{\cos(\gamma+\mu) \cdot (f_c - \sin\alpha) - f_1 \cos\alpha \cos\mu}{\cos(\gamma+\mu) \cdot \cos\beta - f_1 \sin\beta \cos\mu} \quad (2.64)$$

Диференціальні рівняння відносного руху частки у проекціях на осі координат  $x$  та  $y$  для випадку її ковзання в негативному напрямку осі  $x$  при силовому контакті з лівою пластиною, на інтервалі зміни фазового кута від  $\frac{3\pi}{2}$  до  $2\pi$ :

$$m\ddot{x} = mA\omega^2 \sin \omega t \cos \beta \cos \gamma + mg \sin \alpha \cos \gamma + F_1 + F_2 + F_3 \cos \gamma, \quad (2.65)$$

$$m\ddot{y} = mA\omega^2 \sin \omega t \cos \beta \sin \gamma + mg \sin \alpha \sin \gamma + N_2 + F_3 \sin \gamma \quad (2.66)$$

З рівняння (2.66) отримаємо вираз сили нормального тиску  $N_2$ :

$$N_2 = -mA\omega^2 \sin \omega t \cos \beta \sin \gamma - mg \sin \alpha \sin \gamma - F_3 \sin \gamma \quad (2.67)$$

Після відповідних підстановок та перетворень рівняння (2.65) має вид:

$$\ddot{x} = a_{+}^{\perp} \cdot (\sin \delta - Z_{+}^{\perp}), \quad (2.68)$$

$$\text{де} \quad a_{+}^{\perp} = A\omega^2 \cdot \frac{\cos(\gamma+\mu) \cdot \cos\beta - f_1 \sin\beta \cos\mu}{\cos\mu}, \quad (2.69)$$

$$Z_{+}^{\perp} = \frac{g}{A\omega^2} \cdot \frac{\cos(\gamma+\mu) \cdot (\sin\alpha + f_c) - f_1 \cos\alpha \cos\mu}{\cos(\gamma+\mu) \cdot \cos\beta - f_1 \sin\beta \cos\mu} \quad (2.70)$$

Для випадку ковзання частинки в негативному напрямку осі  $x$  при силовому контакті з правою пластиною, на інтервалі зміни фазового кута від  $2\pi$  до  $\frac{5\pi}{2}$ , диференціальні рівняння відносного руху в проекціях на осі координат  $x$  і  $y$  мають відповідно вид рівнянь (2.65) та (2.43). Сила  $N_2$  визначається рівнянням (2.47). Після перетворення рівняння відносного руху частинки вздовж осі  $x$  отримаємо:

$$\ddot{x} = a_{+}^n \cdot (\sin \delta - Z_{+}^n), \quad (2.71)$$

$$\text{де} \quad a_{+}^n = A\omega^2 \cdot \frac{\cos(\gamma-\mu) \cdot \cos\beta - f_1 \sin\beta \cos\mu}{\cos\mu}, \quad (2.72)$$

$$Z_{+}^n = -\frac{g}{A\omega^2} \cdot \frac{f_1 \cos\alpha \cos\mu + \cos(\gamma-\mu) \cdot (\sin\alpha + f_c)}{\cos(\gamma-\mu) \cdot \cos\beta - f_1 \sin\beta \cos\mu} \quad (2.73)$$

Узагальнюючи отримані рівняння, маємо

$$\ddot{x} = \alpha \cdot (\sin \delta - Z), \quad (2.74)$$

де

$$\alpha = \begin{cases} a_{+}^n = A\omega^2 \cdot \frac{f_1 \sin \beta \cos \mu + \cos \beta \cos(\gamma + \mu)}{\cos \mu} \text{ при } \pi \leq \delta \leq \delta_{2+}^n \\ a_{+}^n = A\omega^2 \cdot \frac{f_1 \sin \beta \cos \mu + \cos(\gamma + \mu) \cdot \cos \beta}{\cos \mu} \text{ при } \frac{\pi}{2} \leq \delta \leq \pi \\ a_{-}^n = A\omega^2 \cdot \frac{f_1 \sin \beta \cos \mu + \cos(\gamma - \mu) \cdot \cos \beta}{\cos \mu} \text{ при } \pi \leq \delta \leq \delta_{2+}^n \\ a_{-}^n = A\omega^2 \cdot \frac{\cos(\gamma + \mu) \cdot \cos \beta - f_1 \sin \beta \cos \mu}{\cos \mu} \text{ при } \delta_{1-}^n \leq \delta \leq \frac{3}{2}\pi \\ a_{+}^n = A\omega^2 \cdot \frac{\cos(\gamma + \mu) \cdot \cos \beta - f_1 \sin \beta \cos \mu}{\cos \mu} \text{ при } \frac{3}{2}\pi \leq \delta \leq 2\pi \\ a_{+}^n = A\omega^2 \cdot \frac{\cos(\gamma - \mu) \cdot \cos \beta - f_1 \sin \beta \cos \mu}{\cos \mu} \text{ при } 2\pi \leq \delta \leq \delta_{2-}^n \end{cases} \quad (2.75)$$

$$Z = \begin{cases} Z_{+}^n = \frac{g}{A\omega^2} \cdot \frac{f_1 \cos \alpha \cos \mu - \cos(\gamma + \mu) \cdot (\sin \alpha + f_c)}{f_1 \cos \mu \cos \beta + \cos(\gamma + \mu)} \text{ при } \pi \leq \delta \leq \delta_{2+}^n \\ Z_{-}^n = \frac{g}{A\omega^2} \cdot \frac{f_1 \cos \alpha \cos \mu - \cos(\gamma + \mu) \cdot (\sin \alpha - f_c)}{f_1 \cos \mu \sin \beta + \cos(\gamma + \mu) \cdot \cos \beta} \text{ при } \frac{\pi}{2} \leq \delta \leq \pi \\ Z_{-}^n = \frac{g}{A\omega^2} \cdot \frac{f_1 \cos \alpha \cos \mu + \cos(\gamma - \mu) \cdot (f_c - \sin \alpha)}{f_1 \sin \beta \cos \mu + \cos(\gamma - \mu) \cdot \cos \beta} \text{ при } \pi \leq \delta \leq \delta_{2+}^n \\ Z_{-}^n = \frac{g}{A\omega^2} \cdot \frac{\cos(\gamma + \mu) \cdot (f_c - \sin \alpha) - f_1 \cos \alpha \cos \mu}{\cos(\gamma + \mu) \cdot \cos \beta - f_1 \sin \beta \cos \mu} \text{ при } \delta_{1-}^n \leq \delta \leq \frac{3}{2}\pi \\ Z_{+}^n = \frac{g}{A\omega^2} \cdot \frac{\cos(\gamma + \mu) \cdot (\sin \alpha + f_c) - f_1 \cos \alpha \cos \mu}{\cos(\gamma + \mu) \cdot \cos \beta - f_1 \sin \beta \cos \mu} \text{ при } \frac{3}{2}\pi \leq \delta \leq 2\pi \\ Z_{+}^n = -\frac{g}{A\omega^2} \cdot \frac{f_1 \cos \alpha \cos \mu + \cos(\gamma - \mu) \cdot (\sin \alpha + f_c)}{\cos(\gamma - \mu) \cdot \cos \beta - f_1 \sin \beta \cos \mu} \text{ при } 2\pi \leq \delta \leq \delta_{2-}^n \end{cases} \quad (2.76)$$

На рисунку 2.6 представлені залежності безрозмірних параметрів  $Z$  опору відносному руху частинки від кута  $\gamma$  установки пластин для одного із поєднань реальних кінематичних та настановних параметрів процесу сепарування:  $A = 40\text{мм}$ ;  $n = 180$  кол/хв.;  $\alpha = 7^\circ$ ;  $\beta = 7^\circ$ ;  $f_1 = 0,4$ ;  $f_2 = 0,35$ ;  $f_c = 0,5$ . Значення параметра  $Z$  наведено у таблиці А.2. На верхньому графіку представлені залежності  $Z(\gamma)$  для випадку, коли частинка нижнього шару рухається у позитивному напрямку осі  $x$ . На нижньому – у негативному. Як видно з графіків  $Z_{+}^n > Z_{-}^n$ ,  $Z_{-}^n < Z_{+}^n$ ,  $|Z_{-}^n| < |Z_{+}^n|$  і  $|Z_{+}^n| < |Z_{-}^n|$  для всіх значення кута  $\gamma$ .

Рисунок 2.6 – Залежність параметра  $Z$  від кута установки пластин  $\gamma$

Графіки залежностей  $Z_+^n(\gamma)$  і  $Z_-^l(\gamma)$ , а також  $Z_-^l(\gamma)$  і  $Z_+^n(\gamma)$  мають точки перетину, тобто існують значення кута у яких  $Z_+^n = Z_-^l$  та  $Z_-^l = Z_+^n$ , причому друга рівність виконується при меншому значенні кута  $\gamma$ . Зліва від точок перетину графіків, тобто при менших кутах,  $Z_+^n = Z_-^l$  і  $Z_-^l = Z_+^n$ , а праворуч, тобто при більших кутах  $Z_+^n < Z_-^l$  і  $|Z_-^l| < |Z_+^n|$ .

З проведених досліджень було зроблено висновок про існування всіх можливих режимів руху частинки, а саме:

режим 1 – двостороннє ковзання частинки з двома паузами;

режим 2 – двостороннє ковзання частинки з двома миттєвими зупинками;

режим 3 – двостороннє ковзання частинки з однією паузою з однією миттєвою зупинкою;

режим 4 – ковзання частинки тільки в одному з напрямків з однією паузою.

Відмінністю реальних режимів є наявність двох або трьох підінтервалів ковзання в кожному з напрямків, що відрізняються різними значеннями параметрів  $Z$  та  $a$ . Крім того, ковзання частинки на окремих підінтервалах можливо за  $Z > 1$ .

Зауважимо, що в даному випадку, при  $Z_+^n > 1$  одночасно не виконуються умови початку ковзання у кожному з напрямків, тобто у цьому разі відсутній рух

частинки щодо опорної поверхні між суміжними пластинами. Області значень, що допускаються, кута орієнтації  $\gamma$  пластин для розглянутих на рисунках випадків обмежені пунктирними лініями, які відповідають умовам  $Z_+^n=1$  та  $Z_-^l=1$  відповідно. Граничне значення кута  $\gamma$  для верхньої залежності менше, що свідчить про те, що існує область значень кута  $\gamma$ , в якій  $Z_+^n < 1$ , а  $|Z_-^l| > 1$ . У цьому випадку рух частинки можливий лише у позитивному напрямку осі  $x$ .

Найбільш раціональним є режим двостороннього ковзання з двома миттєвими зупинками, тому що він дозволяє найбільш повно використовувати час перебування сепарованого матеріалу на поверхні робочого органу, оскільки процеси самосортування та просіювання частинок відбуваються переважно при їхньому відносному русі.

Проведені теоретичні дослідження дозволили визначити, що існування раціонального режиму можливо за  $Z_+^n \leq 0,115$ .

Дослідження проводили для наступних значень коефіцієнтів опору зсуву  $f_1=0,4$ ;  $f_2=0,35$ ;  $f_c=0,5$  для наступного кінематичного діапазону та настановних параметрів роботи опорної поверхні:

- число коливань опорної поверхні за хвилину  $n$  від 150 до 450 кол/хв;
- амплітуда коливань опорної поверхні  $A$  від 9 до 36 мм;
- кут нахилу опорної поверхні до горизонту  $\alpha$  від 1 до 20°;
- кут нахилу коливань до площини опорної поверхні  $\beta$  від 1 до 7°;
- кут нахилу рифлів до напрямку коливань  $\gamma$  від 35 до 60°;

#### **2.4. Вплив кінематичних та настановних параметрів на середню швидкість відносного руху частки**

Аналіз результатів теоретичного дослідження свідчить, що на величину середньої швидкості вібропереміщення частинки суттєво впливають кінематичні та настановні параметри. Вплив таких кінематичних параметрів як амплітуда

коливань опорної поверхні  $A$  та число коливань опорної поверхні за хвилину  $n$  представляє великий інтерес, оскільки в умовах виробництва вони є найбільш зручними для управління процесом сепарування.

Залежність середньої  $V_{\text{ср}}$  швидкості від  $n$ , зображені на рисунках 2.7-2.10 отримані для  $A = 15$  мм. Залежність середньої  $V_{\text{ср}}$  швидкості від  $A$ , зображені на рисках 2.7-2.8 для  $n = 350$  кол/хв.

На рисунку 2.7 зображені залежності середньої  $V_{\text{ср}}$  швидкості від  $n$  для різних значень кута  $\alpha$ . Зміна  $n$  від 300 до 450 кол/хв. призводить до збільшення  $V_{\text{ср}}$  у середньому у 7,5 разів. Зміна кута на 1 градус для найбільшого з досліджених значень  $n = 215$  кол/хв. призводить до зміни  $V_{\text{ср}}$  в середньому в 1,04 рази. Це співвідношення збільшується зі зменшенням  $n$  і значення  $n = 200$  кол/хв. становить - 1,09 рази.

$V_{\text{ср}}, \text{ м/с}$

$$1 - \alpha = 4^\circ; 2 - \alpha = 5^\circ; 3 - \alpha = 6^\circ; 4 - \alpha = 7^\circ; 5 - \alpha = 8^\circ; 6 - \alpha = 9^\circ$$

Рисунок 2.7 – Залежність середньої швидкості  $V_{\text{ср}}$  від числа коливань опорної поверхні за хвилину  $n$  для різних значень кута  $\alpha$  нахилу опорної поверхні до горизонталі при  $\beta = 7^\circ, \gamma = 45^\circ$

Залежність середньої швидкості  $V_{\text{ср} \text{ р}}$  від  $n$  для різних значень кута  $\beta$  нахилу коливань опорної поверхні показані на рисунку 2.8. Зміна  $n$  від 300 до 450 кол/хв. призводить до збільшення  $V_{\text{ср}}$  в середньому в 7,3 рази. Зміна кута  $V_{\text{ср}}$  на 1 градус для всіх розглянутих поєднань призводить до зміни  $V_{\text{ср} \text{ р}}$  у середньому в 1,11 рази. Вплив зміни  $n$  при цьому незначний.

$V_{\text{ср}}, \text{ м/с}$

$$1 - \beta = 4^\circ; 2 - \beta = 5^\circ; 3 - \beta = 6^\circ; 4 - \beta = 7^\circ; 5 - \beta = 8^\circ; 6 - \beta = 9^\circ$$

Рисунок 2.8 – Залежність середньої швидкості  $V_{\text{ср}}$  від числа коливань опорної поверхні за хвилину  $n$  для різних значень кута  $\beta$  нахилу коливань опорної поверхні до горизонталі при  $\alpha = 7^\circ, \gamma = 45^\circ$

Залежність середньої швидкості  $V_{\text{ср}}$  від  $n$  для різних значень кута  $\gamma$  установки пластин наведено на рисунку 2.9. Так, збільшення кута  $\gamma$  на 1 градус призводить до зменшення  $V_{\text{ср}}$  в середньому на 5,9 мм/с.

$V_{\text{ср}}, \text{ м/с}$

$$1 - \gamma = 4^\circ; 2 - \gamma = 5^\circ; 3 - \gamma = 6^\circ; 4 - \gamma = 7^\circ; 5 - \gamma = 8^\circ; 6 - \gamma = 9^\circ$$

Рисунок 2.9 – Залежність середньої швидкості  $V_{\text{ср}}$  від числа коливань опорної поверхні за хвилину  $n$  для різних значень кута  $\gamma$  установки пластин на опорній поверхні до горизонталі при  $\alpha = 7^\circ, \beta = 7^\circ$

На рисунку 2.10 показані залежності середньої  $V_{\text{ср}}$  швидкості від амплітуди  $A$  для різних значень кута нахилу  $\alpha$  опорної поверхні. Зміна  $A$  від 9 до 21 мм наводить до збільшення  $V_{\text{ср}}$  у середньому 3,7 разу. Зміна на 1 градус для

найбільшого із досліджених значень  $A = 20$  мм призводить до зміни  $V_{\text{ср}}$  у середньому у 1,05 рази. Це співвідношення збільшується зі зменшенням  $A$  і значення  $A = 20$  мм становить – 1,08 рази.

Залежність середньої  $V_{\text{ср}}$  швидкості від  $A$  для різних значень кут  $\beta$  нахилу коливальних опорної поверхні зображено на рисунку 2.11. Вплив зміни  $A$  на значення  $V_{\text{ср}}$  всім розглянутих  $\beta$  аналогічно розглянутому вище на рисунку 2.10 випадку і дорівнює в середньому в 3,7 рази. Для всіх розглянутих поєднань  $A$  та  $\beta$  зміна  $V_{\text{ср}}$  аналогічно розглянутому на рисунку 2.7 випадку та становить у середньому в 1,11 рази. При цьому вплив зміни  $A$  незначний.

Залежність зміни середньої швидкості  $V_{\text{ср}}$  від  $A$  для різних значень кута  $\gamma$  установки пластин зображені на рисунку 2.12. З залежності видно, що зменшення кута  $\gamma$  наближає залежність середньої швидкості до лінійної. Зі збільшенням кута  $\gamma$  відбувається зменшення середньої швидкості  $V_{\text{ср}}$ . Так, збільшення кута  $\gamma$  на 1 градус призводить до зменшення  $V_{\text{ср}}$  у середньому на 5,5 мм/с.

З отриманих залежностей видно, що найбільше впливає на зміну величини середньої швидкості  $V_{\text{ср}}$  зміна кута  $\gamma$  установки пластин на опорній поверхні, а найменше – кута  $\alpha$  нахилу опорної поверхні до горизонталі.

$V_{\text{ср}}, \text{ м/с}$

1 –  $\alpha = 4^\circ$ ; 2 –  $\alpha = 5^\circ$ ; 3 –  $\alpha = 6^\circ$ ; 4 –  $\alpha = 7^\circ$ ; 5 –  $\alpha = 8^\circ$ ; 6 –  $\alpha = 9^\circ$

Рисунок 2.10–Залежність середньої швидкості  $V_{\text{ср}}$  від амплітуди  $A$  коливальних для різних значень кута  $\alpha$  коливальних опорної поверхні до горизонталі при  $\beta = 7^\circ$ ,  $\gamma = 45^\circ$

$V_{\text{ср}}, \text{ м/с}$

$$1 - \beta = 4^\circ; 2 - \beta = 5^\circ; 3 - \beta = 6^\circ; 4 - \beta = 7^\circ; 5 - \beta = 8^\circ; 6 - \beta = 9^\circ$$

Рисунок 2.11 – Залежність середньої швидкості  $V_{\text{ср}}$  від амплітуди  $A$  коливань для різних значень кута  $\beta$  коливань опорної поверхні до горизонталі при  $\alpha = 7^\circ, \gamma = 7^\circ$

$V_{\text{ср}}, \text{ м/с}$

$$1 - \gamma = 42^\circ; 2 - \gamma = 43^\circ; 3 - \gamma = 44^\circ; 4 - \gamma = 45^\circ; 5 - \gamma = 46^\circ; 6 - \gamma = 47^\circ$$

Рисунок 2.12 – Залежність середньої швидкості  $V_{\text{ср}}$  від амплітуди  $A$  коливань для різних значень кута  $\gamma$  установки пластин на опорній поверхні до горизонталі при  $\alpha = 7^\circ, \beta = 7^\circ$

### *Висновки.*

1. На основі проведених теоретичних досліджень запропоновано та обґрунтовано динамічна модель вібраційного переміщення частинок нижнього шару між суміжними рифлями при зворотно-поступальних коливаннях опорної поверхні.

2. Теоретично визначено можливі режими руху частки нижнього шару між суміжними рифлями за період коливань опорної поверхні:

- двостороннє ковзання частинки з миттєвими зупинками;
- двостороннє ковзання частинки з паузами;
- двостороннє ковзання частинки з паузою та миттєвою зупинкою;
- одностороннє ковзання частинки.
- одностороннє ковзання частинки у позитивному напрямку осі  $x$ .

3. Для можливих режимів одержано вирішення основного завдання теорії вібраційного переміщення – визначення середньої швидкості частинок нижнього шару між суміжними рифлями опорної поверхні.

4. Визначено раціональний для здійснення процесів сепарування режим руху частинок нижнього шару - двостороннє ковзання з миттєвими зупинками без пауз.

5. Виявлено залежність середньої швидкості частинки нижнього шару від наступних кінематичних та настановних параметрів процесу: частоти  $n$  та амплітуди  $A$  коливань опорної поверхні, кутів нахилу  $\alpha$  опорної поверхні,  $\beta$  нахилу коливань та  $\gamma$  встановлення рифлів.

6. Вплив кута нахилу  $\alpha$  опорної поверхні на зміну середньої швидкості  $V_{\text{ср}}$  зменшується зі збільшенням  $n$  і  $A$ , зміна  $\beta$  нахилу коливань на 1 градус для всіх розглянутих поєднань  $n$  і  $A$  призводить до зміни  $V_{\text{ср}}$  у середньому в 1,11 рази, а збільшення кута  $\gamma$  установки пластин на 1 градус для всіх розглянутих поєднань  $n$  і  $A$  призводить до зменшення  $V_{\text{ср}}$  в середньому на 0,0057 м/с або 5,7 мм/с.

7. Найбільший вплив на зміну величини середньої швидкості  $V_{\text{ср}}$  надає зміна кута  $\gamma$  установки пластин на опорній поверхні, а найменше - кута  $\alpha$  нахилу опорної поверхні до горизонталі.

8. Отримано аналітичні рівняння залежностей середньої  $V_{\text{ср}}$  швидкості частинки нижнього шару від кінематичних та настановних параметрів роботи опорної поверхні.

## 3 МЕТОДИКА ДОСЛІДЖЕНЬ

### 3.1 Експериментальна установка

Установка, що забезпечує горизонтальні поворотно-поступальні коливання горизонтально встановленої опорної поверхні (рис. 3.1) складається з станини із встановленими на ній двома горизонтальними рейками 1, горизонтального каналу, обмеженого вертикальними стінками, з жорстко закріпленою на ній опорною поверхнею 2. Поворотно-поступальні коливання робочої поверхні забезпечуються обертанням ексцентрика 3. Спосіб фіксації ексцентрика на осі за допомогою гвинта дозволяє ставити амплітуду  $A$  коливань.

Ексцентрик наводиться в рух електродвигуном 6 через клинопасову передачу 5. Можливість зміни частоти коливань досягається завдяки лобового варіатору 4.

Установка дозволяє варіювати число коливань опорної поверхні хвилину  $n$  в межах від 0 до 500 кол/хв.

1 – станина; 2 – канал із закріпленою опорною поверхнею; 3 – ексцентрик; 4 -варіатор; 5 – ремінна передача; 6 – електродвигун.

Рисунок 3.1 – Схема експериментальної установки для сполучення горизонтальних коливань горизонтальної опорної поверхні

### 3.2 Методика експерименту

Час впливання визначали для пофарбованої частинки легкої домішки, найбільш поширеною серед домішок для пшениці, що зустрічаються, це соломинки.

В ході експериментів пофарбовану частинку поміщали на рифлі під шар зерна певної висоти. Після цього за допомогою секундоміра з точністю до 0,01 с засікали час  $\tau$ , який вимагався частинці для спливу на поверхню шару зерна, яке вважали шуканим для даних експериментів. Час спливання легкої частинки визначали при різній товщині шару зерна над поверхнею рифлів. Для підтвердження ефективності впливу рифлів у серіях експериментів визначали час впливання легкої частинки через шар 30 мм за таких умов; товщина шару над рифлями 30 мм; товщина шару над рифлями 40 мм. У першому випадку легку частинку укладали на рифлі під шар зерна. У другому випадку – на відстані 10мм від рифлів під шар зерна.

За цих умов фіксували час впливання і шляхом порівняння отриманих даних робили висновок про ефект.

Частоту коливань опорної поверхні змінювали за допомогою лобового варіатора. Значення частоти коливань фіксувалося цифровим фототахометром з точністю до 0,1 кол/хв. Амплітуда коливань  $A$  робочої поверхні визначали за допомогою лінійки з ціною поділу 1 мм.

Амплітуду коливань змінювали за допомогою гвинтової передачі з встановленим на ній ексцентриком 3 (рис. 3.1). Амплітуду визначали наступним чином: на станині 1 встановили міліметрову шкалу, а на поздовжній стінці каналу з встановленою в ньому опорною поверхнею 2 жорстко закріпили покажчик у вигляді вертикально розташованої стрілки таким чином, що при обертанні ексцентрика 3 її кінець знаходився в межах міліметрової шкали. Перед початком експерименту шляхом провороту ексцентрика визначали величину

відхилення від «нульової» відмітки, встановленої на рівні осі обертання ексцентрика 3 та шківу варіатору 4.

Експеримент проводили на розробленій опорній поверхні з рифлями, що утворюють зигзагоподібні канали (рис. 3.2), які зорієнтовані на робочій поверхні так, щоб під впливом вібрації відбувалося транспортування по поверхні частинок нижнього шару. Це виключає утворення застійних зон продукту. Поверхня виконана у двох варіаціях – з висотою рифлів 5 та 10 мм.

Направлення коливань опорної поверхні

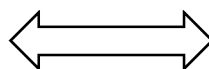


Рисунок 3.2 – Опорна рифлена поверхня: а)  $K = 10$  мм; б)  $K = 5$  мм

Оскільки вплив рифлів полягає у збільшенні різниці відносної швидкості нижнього та верхнього шарів за рахунок зменшення абсолютної величини переміщення нижнього шару під впливом рифлів, вибираємо крок установки рифлів мінімально можливий за умови, щоб не допустити забивання простору між рифлями. Оскільки довжина зерен пшениці лежить у межах від 4,6 до 8,6 мм, запобігання забиванню частинок зерноsumіші між суміжними рифлями приймаємо крок встановлення суміжних рифлів рівним 10 мм.

У ході експериментів варіювали:

- висоту верхнього шару продукту над рифлями від 10 до 40 мм, при цьому шукана частка легкої домішки, залежно від початкових умов, могла перебувати як на рифлях, так і безпосередньо в самому шарі зерна від 10 до 30 мм;

- число коливань опорної поверхні за хвилину  $n$  від 200 до 500 кол/хв;

- положення осі більшого розміру частинки щодо напрямку коливань - паралельно та перпендикулярно до напрямку коливань;

- висота рифлів  $K$  - 5 та 10 мм;

Оскільки легкі домішки, перебуваючи в зерноsumіші, мають довільне «позиціонування» щодо спрямування коливань, що може позначитися на точності результатів експериментів, шукану частинку в ході експерименту встановлювали віссю більшого розміру строго певним чином:

- паралельно напрямку коливань -  $\parallel$ ;

- перпендикулярно до напрямку коливань -  $\perp$ .

Вплив «позиціонування» шуканої частинки легкої домішки перпендикулярно напрямленню коливань оцінювали наближення отриманих результатів до реального процесу самосортування. Для цього розраховували середнє значення даних отриманих при оцінці двох типів «позиціонування».

## 4 РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ

### 4.1 Визначення швидкості частинок нижнього шару між суміжними рифлями опорної поверхні

За основу досліджень було взято модель, що описує похилі коливання похилої опорної поверхні.

Установка, що забезпечує зворотно-поступальні коливання під кутом до опорної поверхні (рис. 4.1.), є модифікацією експериментальної установки, наведеної на рис 3.1.

1 – станина; 2 - канал із закріпленою опорною поверхнею; 3 – ексцентрик; 4 - варіатор; 5 – ремінна передача; 6 – електродвигун; 7 - вібраційний живильник; 8 – «ніж».

Рисунок 4.1 - Схема експериментальної установки для сполучення похилих коливань похилої опорної поверхні

Для забезпечення направлено переміщення зерноsumіші в каналі з встановленою опорною поверхнею видалена торцева стінка. Встановлений шарнірно канал із закріпленою в ньому опорною поверхнею 2 дозволяє

змінювати кут нахилу опорної поверхні  $\alpha$ . На рамі 1 передбачено пристрій для зміни кута нахилу коливача. Вихідна зернова суміш подається вібраційним живильником 7 з можливістю варіювання подачі зерноsumіші, тим самим змінюючи питоме навантаження, що припадає на опорну поверхню. Під питомим навантаженням  $q$  (кг/см-год) розуміється кількість зерна, що припадає в одиницю часу на одиницю ширини каналу.

Дослідження впливу кількості коливача опорної поверхні за хвилину  $n$  та амплітуди коливача на середню швидкість частинок нижнього шару  $V_{\text{сер}}$  показали:

- зміна числа коливача опорної поверхні за хвилину  $n$  і від 300 до 450 кол/хв призводить до збільшення середньої швидкості  $V_{\text{сер}}$  частинок нижнього шару в 8,3 рази (рис.4.2);

- зміна амплітуди коливача опорної поверхні  $A$  від 9 до 21 мм призводить до збільшення середньої швидкості  $V_{\text{сер}}$  частинок нижнього шару в 3,6 рази (рис.4.3).

$V_{\text{сер}}, \text{ м/с}$

с

----- розрахунок

—○— експеримент

Рисунок 3.2 - Залежність середньої швидкості  $V_{\text{сер}}$  частинки нижнього шару від кількості коливача опорної поверхні за хвилину  $n$  при  $A - 15$  мм розрахунок

----- розрахунок  
 —○— експеримент

Рисунок 4.3 - Залежність середньої швидкості  $V_{\text{сер}}$  частинки нижнього шару від амплітуди коливань опорної поверхні  $A$  при  $n = 350$  кол/хв

#### **4.2 Визначення області раціональних параметрів спливання легких домішок у верхній шар зернової суміші**

Для проведення даного дослідження була розроблена опорна поверхня із зигзагоподібними рифлями, висота яких плавно підвищувалася від 3 до 25 мм у всій довжині опорної поверхні (рис. 4.4). Висота рифлів 3 мм дозволить знизити ймовірність попадання частинок легкої домішки у простір між рифлями. При такому виконанні рифлів на ділянці у приймальній частині робочої поверхні область інтенсивного самосортування знаходиться в нижньому шарі зернового потоку. У міру просування зернової суміші вздовж робочої поверхні на кожному наступному ділянці поверхні область інтенсивного самосортування в зерновому потоці переходить з нижчележачого до вищележачого шару. На сходовій ділянці робочої поверхні, тобто наприкінці шляху зернової суміші по опорній поверхні, в області інтенсивного самосортування знаходиться верхній шар зернового потоку. Таким чином, висока ефективність розшарування зернової суміші на робочій поверхні пристрою досягається завдяки тому, що області інтенсивного

#### Рисунок 4.4 – Опорна поверхня

самосортування у зерновому потоці розподілені за його довжиною так, що забезпечується висока швидкість спливання легких домішок протягом усього часу перебування на робочій поверхні.

Висота рифлів 25 мм дозволить забезпечити високу концентрацію легких домішок у верхньому шарі зерноsumіші малої висоти, що підвищить ефективність роботи вертикального повітряного каналу.

При дослідженні впливу числа коливань опорної поверхні за хвилину  $n$  на масову частку верхнього шару, проводили при  $A = 15$  мм,  $q = 70$  кг/см-год,  $\gamma = 45^\circ$  для різних кут  $\alpha$  нахилу опорної поверхні ніж був встановлений на рифлях наприкінці каналу при висоті нижнього шару 25 мм.

Визначення кількості коливань опорної поверхні за хвилину, що забезпечує найменшу масову частку верхнього шару, дозволить знизити питому навантаження на пневмосепаратор і тим самим підвищити ефективність його роботи.

Аналіз результатів експериментів показав:

1. Зміна числа коливань опорної поверхні за хвилину  $n$  від 300 до 425 кол/хв призводить до зниження масової частки верхнього шару в середньому 1,3 рази. Дані результати підтверджуються проведеним раніше дослідженням залежності середньої швидкості частинки нижнього шару від частоти коливань

опорної поверхні, що показали, що збільшення  $n$  збільшує швидкість руху частинок нижнього шару між суміжними рифлями опорної поверхні.

2. Значення  $n = 300$  кіл/хв і  $\alpha = 5^\circ$  забезпечують найбільшу масову частку верхнього шару – 56%.

3. Найменша масова частка верхнього шару зафіксована при частоті коливань опорної поверхні  $n = 400$  кіл/хв і для кутів нахилу опорної поверхні 5, 7 та 9 градусів склала - 47%, 39,5% та 34% відповідно. 4. Збільшення  $n$  більше 400 кіл/хв призводить до збільшення масової частки верхнього шару, що не відповідало поставленому завданню.

5. Число коливань опорної поверхні  $n = 400$  кіл/хв забезпечує найменшу масову частку верхнього шару продукту. Це значення частоти коливань приймаємо основним для наступних експериментів.

*n, кол/хв*

$$1 - \alpha = 5^\circ; 2 - \alpha = 7^\circ; 3 - \alpha = 9^\circ$$

Рисунок 4.5 - Залежність масової частки верхнього шару від  $n$

Аналіз результатів експериментів показав (рис.4.6):

1. Зміна амплітуди коливань опорної поверхні  $A$  від 11 до 21 мм при числі коливань опорної поверхні за хвилину  $n = 300$  кол/хв знижує масову частку верхнього шару більш ніж в 1,5 рази, а при  $n = 400$  кол/хв - в 1,2 рази. Отже, збільшення амплітуди коливань збільшує швидкість руху частинок нижнього шару між суміжними рифлями опорною поверхні.

2. Найбільше значення масової частки верхнього шару спостерігається при амплітуді коливань  $A = 11$  мм і при числі коливань опорної поверхні за хвилину  $n = 300$  кол/хв становить 75%, а при  $n = 400$  кол/хв - 53,5%. Подальше зменшення амплітуди коливань недоцільно, оскільки призведе до підвищення масової частки верхнього шару, що не становить практичного інтересу.

3. При досягненні амплітуди коливань  $A = 15$  мм подальше зменшення масової частки шару на 5% вважаємо незначним сказати. Тому можна вважати, що раціональна амплітуда коливань опорної поверхні  $A = 15$  мм

1 -  $n = 300$  кол/хв.

2 -  $n = 400$  кол/хв.

Рисунок 4.6 - Залежність масової частки верхнього шару від  $A$

При дослідженні залежності масової частки верхнього шару від кута нахилу опорної поверхні та його раціонального значення при  $A = 15$  мм,  $n = 400$  кол/хв,  $q = 70$  кг/см-год,  $\beta = 7^\circ$ ,  $\gamma = 45^\circ$  ніж був встановлений на рифлях наприкінці каналу при висоті рифлів при висоті нижнього шару 25 мм.

Аналіз результатів експериментів показав (рис.4.7):

1. Залежність зміни масової частки верхнього шару від кута нахилу опорна поверхня близька до лінійної. Збільшення кута нахилу опорної поверхні з  $5^\circ$  до  $9^\circ$  призводить до зниження масової частки верхнього шару на 14%.

2. Збільшення кута  $\alpha$  нахилу опорної поверхні на  $1^\circ$  знижує масову частку верхнього шару на 3,5%.

3. При зміні кута  $\alpha$  нахилу поверхні від  $5^\circ$  до  $7^\circ$  вся легка домішка виділяється у верхній шар зерноsumіші. У зв'язку з цим, кут нахилу опорної поверхні  $\alpha = 7^\circ$  вважаємо раціональним.

Рисунок 4.7 - Залежність масової частки верхнього шару від кута опорного нахилу поверхні  $\alpha$

Дослідження впливу величини питомої навантаження на ефективність впливання легких домішок при  $A = 15$  мм,  $n = 400$  кол/хв,  $\alpha = 7^\circ$ ,  $\beta = 7^\circ$ ,  $\gamma = 45^\circ$  проводили для різних положень «ножа».

Аналіз результатів експериментів показав (рис.4.8):

1. Збільшення питомого навантаження від 70 до 120 кг/см-год призвело до збільшення масової частки верхнього шару при «ножі» встановленому на рифлях - 2,8 рази, а при піднятому над рифлями «ноже» – у 4,7 рази. Збільшення масової частки знижує ефективність подальшої очистки зерна в пневмоканалі, так як велике кількість зерна перешкоджатиме ефективному видаленню легкої домішки.

2. Подальше підвищення питомого навантаження недоцільне через те, що за  $q = 120$  кг/см-год масова частка верхнього шару перевищила 50%.

3. Збільшення питомого навантаження від 70 до 120 кг/см-год призвело до зниження ефективності самосортування легких домішок в середньому на 11%.

4. Установка «ножа» над рифлями призвела до зниження ефективності самосортування легких домішок у середньому на 14%. Таким чином було визначено розташування «ноіжа» на опорній поверхні – «ніж» має бути встановлений безпосередньо на рифлях.

5. Експериментально визначено величину питомого навантаження на опорну поверхню при раціональних параметрах процесу, при якій усі легкі домішки в межах встановленої похибки потрапляють у верхній шар зерноsumіші -  $q = 70$  кг/см-год. У пневмоканал в даному випадку буде подаватися 19% зерноsumіші.

6. Залежність ефективності самосортування легких домішок від питомого навантаження  $q$  при «ножі», встановленому на рифлях, близька до лінійної.

$q$ , кг/см-год

1 – «ніж» лежить на рифлях висотою 25 мм  
2 – «ніж» піднятий над рифлями на висоту 15 мм

Рисунок 4.8 - Залежність ефективності спливання легких домішок та масової частки верхнього шару від питомого навантаження

Отже, «ніж» повинен розташовуватися безпосередньо на рифлях опорної поверхні, а також встановлено, що збільшення питомого навантаження від 70 до 120 кг/см-год знижує ефективність спливання легких домішок в середньому на 11%. Було встановлено лінійний характер залежності ефективності при «ножі» встановленому на рифлях.

Висновки:

1. Підтверджено ефективність запропонованої опорної поверхні для процесу самосортування легких домішок
2. Експериментально визначено раціональні кінематичні та настановні параметри при впливанні легких домішок у верхній шар зерноsumіші.
3. Експериментально визначено розташування «ножа» на опорній поверхні - «ніж» має бути встановлений безпосередньо на рифлях.
4. Експериментально визначено величину питомого навантаження на робочу поверхню при раціональних параметрах процесу, при якій усі легкі домішки в межах встановленої похибки потрапляють у верхній шар зерноsumіші -  $q = 70$  кг/см-год. У вертикальний пневмоканал у цьому випадку подаватиметься 19% зерноsumіші.

#### **4.3 Визначення області раціональних параметрів занурення дрібних домішок у нижній шар зернової суміші**

Діапазон зміни висоти рифлів обрали із застосуванням досвіду попередніх експериментів, внаслідок чого зниження рифлів відбувається від 25 мм до 3 мм.

Рисунок 4.9 - Положення рифлів змінної висоти вздовж довжини опорної поверхні

Вищенаведені дослідження показали, що зміни кута нахилу опорної поверхні може впливати на занурення дрібних домішок. Дану серію експериментів проводили для дослідження ефективності досліджуваного процесу від кута нахилу опорної поверхні та визначення його раціонального значення. Експеримент проводили при  $A = 30$  мм,  $n = 250$  кол/хв,  $\gamma = 45^\circ$ ,  $q = 70$  кг/см-год.

Аналіз результатів експериментів показав (рис.4.10).

1. Зміна кута нахилу опорної поверхні від  $5$  до  $9^\circ$  призвело до зниження масової частки нижнього шару на  $8,6\%$ .

2. Зміна кута нахилу опорної поверхні на  $1^\circ$  призводить до зміни ефективності занурення у середньому  $5\%$ .

3. Збільшення кута нахилу опорної поверхні від  $5$  до  $7^\circ$  призвело до підвищення ефективності процесу на  $103\%$ . Подальше підвищення кута нахилу викликало зниження ефективності.

4. Найбільша ефективність була отримана під час встановлення кута нахилу опорної поверхні  $\alpha = 7^\circ$  і становило  $78,4\%$ . У зв'язку з цим, кут нахилу опорної поверхні  $\alpha = 7^\circ$  вважаємо раціональним і будемо використовувати для подальших досліджень.

Це дослідження дозволило встановити раціональне значення кута нахилу опорної поверхні  $\alpha = 7^\circ$ , а також визначити, що зміна кута нахилу призводить до зміни ефективності процесу загалом на  $5\%$ .

Рисунок 4.10 - Залежність ефективності занурення дрібних домішок від кута  $\alpha$  нахилу опорної поверхні

Дослідження ефективності процесу очищення від дрібних домішок від числа коливань опорної поверхні хвилину та визначення раціонального її значення проводили при  $A = 30$  мм,  $q = 70$  кг/см-год,  $\alpha = 7^\circ$ ,  $\beta = 7^\circ$ ,  $\gamma = 45^\circ$ .

Аналіз результатів експериментів показав (рис.4.11).

*n, кол/хв*

Рисунок 4.11 - Залежність ефективності занурення дрібних домішок від  $n$

1. Збільшення числа коливань опорної поверхні за хвилину  $n$  від 175 до 300 кіл/хв призводить до збільшення масової частки нижнього шару на 16,2%. Збільшення масової частки має негативний вплив на занурення дрібних домішок, тому варто прагнути менших значень  $n$ .

2. Збільшення числа коливань опорної поверхні за хвилину «від 175 до 225 кол/хв призвело до підвищення ефективності процесу на 36,4%. Мала ефективність процесу на низьких частотах пояснюється низькою інтенсивністю самосортування внаслідок недостатньої величини амплітудного прискорення, надається зерноsumіші. Подальше збільшення  $n$  призвело до зниження ефективності процесу та підвищення масової частки нижнього шару, що не представляє практичного інтересу.

3. Найбільше значення ефективності очищення рівне 82% отримано при числі коливань опорної поверхні за хвилину  $n = 225$  кол/хв. Масова доля нижнього шару при даному хвилину  $n$  дорівнює 34,2%. Це значення частоти коливань вважаємо раціональним.

Це дослідження дозволило встановити раціональне значення числа коливань опорної поверхні за хвилину  $n = 225$  кіл/хв і визначити, що підвищення числа коливань від 175 до 300 кол/хв призводить до збільшення масової частки нижнього шару на 16,2%, що буде негативно впливати на занурення дрібних домішок. Таким чином, потрібно прагнути до найменших можливих значень числа коливань за хвилину.

Визначення залежності ефективності занурення дрібних домішок від амплітуди коливань опорної поверхні проводили при  $n = 225$  кол/хв,  $q = 70$  кг/см-год,  $\alpha = 7^\circ$ ,  $\beta = 7^\circ$ ,  $\gamma = 45^\circ$ .

Аналіз результатів експериментів показав (рис.4.12).

Рисунок 4.12 - Залежність ефективності занурення дрібних домішок від амплітуди

1. Збільшення амплітуди коливань опорної поверхні  $A$  від 26 до 36 мм призводить до збільшення масової частки нижнього шару на 239%. Найменше значення масової частки нижнього шару відповідає амплітуді коливань опорної поверхні  $A = 26$  мм становить 26,5%.

2. Залежність ефективності занурення дрібних домішок від амплітуди коливань опорної поверхні має екстремальний характер. Найбільше значення ефективності спостерігається при амплітуді коливань опорної поверхні  $A = 32$  мм і становить 87,5%. Дане значення амплітуди вважаємо раціональним та будемо використовувати для подальших досліджень.

3. Подальше підвищення амплітуди коливань призводить до збільшення масової частки нижнього шару і, як наслідок, зниження ефективності процесу, що не становить практичного інтересу.

Це дослідження дозволило визначити раціональне значення останнього з кінематичних параметрів - амплітуду коливань опорної поверхні  $A = 32$  мм, коли він досягається ефективність процесу дорівнює 87,5%.

Визначення впливу величини питомої навантаження на ефективність занурення дрібних домішок при  $A = 32$  мм,  $n = 225$  кіл/хв,  $\alpha = 7^\circ$ ,  $\beta = 7^\circ$ ,  $\gamma = 45^\circ$ .

Аналіз результатів експериментів показав (4.13).

Рисунок 4.13 - Залежність ефективності занурення дрібних домішок та масової частки нижнього шару від питомого навантаження

1. Збільшення питомого навантаження  $q$  від 70 до 130 кг/см-год призвело до зниження ефективності занурення дрібних домішок у нижній шар на 36% та зниження його масової частки на 17%.

2. Найбільше значення ефективності зафіксовано за величиною питомого навантаження  $q = 70$  кг/см-ч і становить 87,5% при найбільшому масовому частці нижнього шару дорівнює 41%.

3. Після досягнення питомого навантаження  $q = 95$  кг/см-год спостерігається ефективність процесу дорівнює 80%. Дане навантаження вважаємо максимально допустимим.

Це дослідження дозволило визначити, що збільшення питомого навантаження від 70 до 120 кг/см-год знижує ефективність виділення легкої

домішки на 36% та масову частку нижнього шару на 17%. Також було визначено максимально можливе для протікання ефективного процесу значення питомого навантаження  $q = 95$  кг/см-год.

Отже, експериментально підтверджено ефективність запропонованої опорної поверхні для очищення зерна пшениці від невеликих домішок; визначено раціональні кінематичні та настановні пара  $q, \text{кг/см-год}$  зануренні дрібних домішок, значення питомого навантаження на робочу поверхню  $q = 95 \text{кг/см-год.}$ , при якій ефективність процесу становила б більше 80%.

Застосування похилої опорної поверхні на стадії вібраційного сепарування дозволить досягти високої концентрації дрібних домішок у нижньому шарі зерноsumіші малої товщини перед попаданням його на плоску ситову поверхню, що сприятиме їх подальшому просіюванню.

#### *Висновки.*

1. Запропоновано та експериментально підтверджено геометрію рифленої опорної поверхні для процесів виділення частинок легкої домішки та очищення від дрібних домішок із зерна пшениці.

2. Визначено області раціональних кінематичних та настановних параметрів у процесах сепарування. Ефективний процес занурення дрібних домішок протікає при малих значеннях частоти і великих значеннях амплітуди коливань, тоді як процес спливання легких домішок протікає при великих значеннях частоти та при малих значеннях амплітуди коливань.

3. Визначено величину питомого навантаження на опорну поверхню при раціональних параметрах процесу, при якій усі легкі домішки в межах встановленої похибки потрапляють у верхній шар зерноsumіші –  $q = 70 \text{кг/см-год.}$  У вертикальний пневмоканаал у цьому випадку подаватиметься 19% зерноsumіші.

4. Визначено значення питомого навантаження на робочу поверхню  $q = 95 \text{кг/см-год.}$ , при якому ефективність процесу більш 80%.

#### 4.4 Опис конструкторської розробки

##### *Робочий орган вібросепаратора*

Пропонований робочий орган відноситься до обладнання зернопереробних підприємств і може бути використано для очищення зерна від дрібних домішок.

У процесі очищення зерна від дрібних домішок у вихідній зерноsumіші, що надходить у приймальну частину опорної поверхні, дрібні домішки рівномірно розподілені по всій товщині зернового потоку. Для досягнення високої ефективності процесу сепарування необхідно забезпечити, щоб дрібні домішки, що знаходяться у верхньому шарі потоку, встигли зануритися в нижній шар, досягти ситової поверхні та просіятись через неї.

На підставі результатів дослідження процесу очищення зерна від дрібних домішок, був розроблено робочий орган вібросепаратора (рис. 4.13), що містить ситову поверхню із прямокутними комірками 1,7x20 мм із встановленими на ній рифлями змінної висоти у вигляді прямокутних пластин, обмежену торцевою та двома бічними стінками. Рифлі утворюють зигзагоподібні канали, розташовані під кутом один до одного та до напрямку транспортування основного зернового потоку по робочому органу.

##### *Живильний лоток пневмосепаратора*

Однією з причин невисокої технологічної ефективності пневмосепарування є та обставина, що вихідна зерноsumіш надходить у вертикальний пневмоканал потоком, в якому частинки компонентів, що розділяються, розподілені по всій товщині зернового шару. Внаслідок цього, частинки компонентів, що розділяються, в зоні сепарування у вертикальному пневмоканалі співударяються при русі в протилежних напрямках, знижуючи ефективність пневмосепарування.

На підставі результатів експериментальних досліджень, отриманих у підрозділі 4.2, у якій досліджували процес самосортування легких домішок, був розроблений лоток живлення пневмосепаратора (рис. 4.14), що містить опорну поверхню з рифлями змінної висоти у вигляді прямокутних пластин, обмежену

торцевою та двома бічними стінками. Рифлі утворюють зигзагоподібні канали, розташовані під кутом один до одного та до напрямку транспортування основного зернового потоку по робочому органу. В кінці живильного лотка встановлений «ніж», призначений для поділу зерноsumіші на верхній та нижній шари. Верхній шар з високою концентрацією легких домішок буде прямувати у вертикальний повітряний канал, тоді як нижній - на подальші операції очищення.

На живильному лотку отриманий високий ефект самосортування. Задача забезпечення високої інтенсивності самосортування вирішена тим, що рифлі виконані змінними по висоті, що плавно збільшується від 3 до 25 мм в напрямі транспортування зернової суміші робочою поверхнею, тобто висота рифлів у приймальній частині робочої поверхні менше, ніж у сходовій частини поверхні.

Експериментальні дослідження підтвердили ефективність розробленої опорної рифленої поверхні.

Зазор між бічними стінками і рифлями, а також між суміжними рифлями залежно від виду сировини дорівнює 10-15 мм.

Кут орієнтації пластин залежить від фізико-механічних властивостей продукту та визначається за умови забезпечення транспортування частинок нижнього шару по опорній поверхні вздовж рифлів і знаходиться в діапазоні від 35 до 60°градусів.

Застосування цього робочого органу на стадії пневмосепарування продуктивністю 7 т/год дозволить знизити навантаження на пневмоканал на 43% завдяки тому, що нижній шар зерна з низькою концентрацією легких домішок буде, минаючи дану стадію очищення, відводитися на подальші технологічні операції. Зниження питомого навантаження дозволить підвищити ефективність процесу завдяки скороченню числа стадій очищення та витрати повітря, а також забезпечить можливість підвищення продуктивності стадії пневмосепарування.

Отже, розроблені робочий орган і лоток живлення можуть бути застосовані як для новоствореного обладнання, так і для модернізації існуючого.

Рисунок 4.13 – Робочий орган вібросепаратора

Рисунок 4.14 – Живильный лоток пневмосепаратора

## 5 ПРАКТИЧНА РЕАЛІЗАЦІЯ РОЗРОБОК

### 5.1 Екологічна експертиза

Ускладнення екологічної ситуації в країні внаслідок забруднення навколишнього природного середовища функціонуючими господарськими об'єктами та комплексами обумовило необхідність розробки та обліку спеціальних природоохоронних розділів при створенні передпроектної, проектно-планової та проектно-кошторисної документації.

Всебічний екологічний аналіз та правильна, достовірна експертна оцінка проектів споруджуваних господарських об'єктів, комплексів та систем набувають принципово важливого значення, оскільки «людські проекти», що не враховують закони природи, приносять чимало лиха.

Важлива роль серед ефективних заходів протидії цьому належить екологічній експертизі. Екологічна експертиза — це комплексний аналіз технологій, матеріалів, устаткування, техніки, проектів, планів, прогнозів та іншої документації, аналіз та оцінка результатів запланованої або існуючої господарської діяльності, що чинить чи може чинити негативний вплив на навколишнє природне середовище, який проводять висококваліфіковані спеціалісти-експерти для визначення відповідності поданих матеріалів чинному законодавству і розробки конструктивних пропозицій щодо охорони навколишнього середовища.

Екологічна експертиза спрямована на запобігання новим, обмеження або ліквідацію існуючим негативним джерелам впливу на оточуюче природне середовище та здоров'я населення. Як вид діяльності спеціально уповноважених органів влади, різних громадських формувань екологічна експертиза спроможна забезпечити дотримання норм і вимог екологічної безпеки при прийнятті законів, обґрунтуванні програм і рішень, проектів соціально-економічного розвитку, розміщення продуктивних сил, будівництві нових підприємств тощо, сформулювати пакет необхідних вимог, дати спеціалістам і громадськості можливість

оцінити ступінь екологічної обґрунтованості різних проектів, сформулювати висновки, пропозиції і рекомендації щодо їх доцільності, визначити можливість реалізації [15].

Необхідність та процедура проведення екологічної експертизи визначені природоохоронним законодавством України. Здійснюється вона на підставі закону України «Про оцінку впливу на довкілля» [15].

З метою недопущення забруднення навколишнього природного середовища при роботі зерноочисних машин передбачаються такі природоохоронні заходи:

- недопущення перевищення викидів визначених концентрацій по основних забруднюючих речовинах в атмосферне повітря;
- недопущення використання обладнання з перевищенням у викиди відпрацьованих газів нормативно встановлених показників CO, CH, NO<sub>2</sub>;
- регулювання викидів забруднюючих речовин в атмосферне повітря в періоди несприятливих метеорологічних умов відповідно заходів передбачених матеріалами ОВНС та документами дозвільного характеру;
- реалізація заходів, з метою мінімізації викиду забруднюючих речовин до атмосферного повітря при впровадженні технологічних операцій;
- суворе дотримання технологічного регламенту;
- ведення технологічного процесу і обслуговування обладнання в суворій відповідності з керівництвом по експлуатації, проектною документацією, виробничими інструкціями, інструкціями з охорони праці, протипожежної і екологічної безпеки;
- вжити заходів щодо недопущення втрат сировини при транспортуванні автотранспортом на зерноочисний та зерносушарний комплекс;
- реалізація заходів щодо зниження пилоутворення під час впровадженні планової діяльності;
- наявність чіткого регламенту та необхідної кількості засобів на випадок виникнення необхідності оперативної ліквідації, у повному обсязі, з метою

мінімізації можливого негативного впливу на оточуюче природне середовище, будь-якої аварійної ситуації;

- припинення будь-яких робіт при виникненні будь-яких нештатних ситуацій до приведення технологічного процесу до нормальних умов;

- організація спеціально відведених та відповідно обладнаних місць для тимчасового зберігання кожного окремого виду небезпечних відходів згідно з їх характеристикою небезпеки та відповідно до вимог діючих санітарно-гігієнічних норм і правил;

- виконання запланованих заходів з охорони та раціональному використанню водних ресурсів;

- використання сучасного технологічного обладнання для ведення технологічного процесу;

- очищення пило-газоповітряної суміші за допомогою циклонів та сепаратора;

- оснащення газорозподільного обладнання скидними клапанами, запірною арматурою, контрольно-вимірювальною апаратурою та автоматикою, забезпечення мінімальної кількості фланцевих з'єднань на технологічних трубопроводах;

- вжиття заходів щодо зниження рівнів шуму;

- влаштування водонепроникного покриття на території проммайданчику та під'їзних автодоріг;

- відведення господарсько-побутових стічних вод в гідроізольований септик з подальшим вивезенням на очисні споруди комунального підприємства;

- використання труб для системи водопостачання й водовідведення із сучасних високоякісних матеріалів;

- реалізація заходів з виключення виникнення забруднення ґрунту;

- недопущення використання техніки з підтіканням ПММ;

- ремонтні роботи техніки, обладнання проводити у спеціально відведених місцях;

- стежити за герметичністю обшивки енергетичних установок, вибухових клапанів, зварних сполучень технологічних трубопроводів, регулярно усувати присоси повітря через обшивку установок, повітропроводів і газоходів;
- забезпечення проведення екологічного моніторингу за станом навколишнього природного середовища.

## 5.2 Охорона праці

Перехід суспільства до широкого використання ринкових відносин, виникнення різноманітних форм власності потребують розроблення нових підходів до побудови сучасної моделі управління охороною й безпекою праці на національному, регіональному й виробничому рівнях. У суспільстві із соціально орієнтованою економікою охорона праці має бути одним з найважливіших завдань соціально-економічної політики як держави, так і кожного підприємства та організації.

Проте нинішній рівень науково-технічного прогресу та соціально-економічні орієнтири розвитку сучасного суспільства не спроможні створити сприятливі умови для забезпечення добробуту людини, збереження її здоров'я. Особливо гостро ця проблема постає на виробничих підприємствах, де зберігається переважно застаріла матеріально-технічна база виробництва при незадовільних обсягах фінансування заходів з охорони праці. Усе це призводить до високого рівня травматизму і, як наслідок, до збільшення видатків підприємства та держави на виплати й компенсації потерпілим. Тому вкрай необхідним є вдосконалення системи охорони праці як важливого фактора підвищення ефективності виробництва на підставі детального дослідження економічних і соціальних її аспектів

Охорона праці – це система законодавчих, соціально-економічних, організаційно-технічних, санітарно-гігієнічних та лікувально-профілактичних заходів, спря16].

Охорона праці в умовах сільськогосподарського виробництва – важливе завдання, вирішення якого забезпечить нормальні умови праці працівниками сільського господарства. Це заходи по подальшому поліпшенню і оздоровленню умов праці, широкому впровадженню сучасних засобів безпеки, усуненню причин, що породжують травматизм, створенню на виробництві необхідних гігієнічних і санітарно-побутових умов.

В роботі проводилися дослідження технологічного процесу очищення насіння. Розглянемо вимоги безпеки під час виконання робіт [17].

Для операторів зерноочисних машин:

- перед включенням машин необхідно переконатися, що поблизу машин відсутні люди і подати звуковий сигнал;

- не можна працювати зі знятими огороженнями пасових і ланцюгових передач трієрних циліндрів та інших обертових частин зерноочисних машин, муфт, блоків натяжних пристроїв, місць набігання полотен транспортерів на барабани, опорних роликів і роликів нижньої гілки стрічки в зонах робочих місць, а також рухомих частин машин і механізмів, що знаходяться в місцях, вільних для доступу;

- необхідно усувати пошкодження, проводити очищення машини від зерна й домішок, мащення й регулювання тільки при виключеному рубильнику, відключеному штепсельному з'єднанні і зупиненій машині.

Під час обслуговування й очищення вузлів машин і електрообладнання, що знаходяться високо, необхідно користуватись розсувною або переносною драбиною з опорними наконечниками, що виключають можливість сковзання її по підлозі (землі, площадці тощо).

При переміщенні самопересувних машин не можна допускати натягу живильного кабелю, а також наїзд на нього.

Під час зміни місця роботи зерноочисних і сортувальних машин, навантажувачів зерна та іншого пересувного обладнання необхідно від'єднати від силової шафи живильний кабель.

Очищати решета необхідно спеціальною щіткою. Регулювання щіток проводиться тільки після зупинки машини.

При обслуговуванні решітних станів зерноочисних машин не можна ставати на раму щіткового механізму.

Під час роботи зерноочисних машин зерно й відходи необхідно прибирати зі скатних дощок і лотків спеціальними скребками з довгими ручками.

Не можна чистити руками осадові камери аспіраційних улаштувань через оглядові люки. Цю роботу необхідно виконувати після повної зупинки машини.

Не можна допускати накопичення пилу, відходів соломи, зернових решток і іншого сміття біля машин, в робочій зоні.

Під час обслуговування транспортерів для переміщення зерна:

- під час роботи транспортера не можна ставати на раму машини, не відкривати кришки люків кожуха;

- для очищення шнеку, що забився зерном, необхідно зупинити машину і відкрити кришки кожуха;

- переміщення транспортерів по території току із швидкістю не більше 5км/год., уникати їх перекидання. Не можна знаходитися у цей час поруч із транспортером;

- при переміщенні транспортерів їхні поворотні скребкові частини необхідно встановлювати паралельно ходовим колесам;

- під час переміщення транспортерів вручну не можна ставати збоку.

Для працівників, які виконують ручні роботи під час обробки зерна:

- необхідно виконувати вказівки тільки керівника робіт;

- не можна підгрібати руками зерно до завантажувальних транспортерів зерноочисних і сортувальних машин, робочих органів навантажувачів, транспортерів тощо. Для роботи необхідно використовувати тільки інструмент (лопати, граблі, совки);

- не можна переступати через неогорожені ланцюги скребкових завантажувальних транспортерів машин.

Виконання вимог безпеки сприяє зниженню травматизму до мінімуму.

З метою запобігання виробничого травматизму необхідно посилити контроль за дотриманням вимог безпеки при виконанні робіт; проводити своєчасне навчання з питань охорони праці; поновити засоби колективного захисту, забезпечити працюючих засобами індивідуального захисту; проводити своєчасно медичні огляди; застосовувати штрафні санкції за порушення вимог безпеки.

### 5.3 Економічне обґрунтування розробки

Розрахунок економічної ефективності проводимо для технологічної лінії з виробництва борошна продуктивністю 130 т/добу при тризмінній роботі для трисортного 75% помелу.

Склад помелу наведений в таблиці 5.1.

Таблиця 5.1 - Склад помелу

Продукти помелу	Масова доля, %
Борошно, всього	75
в тому числі:	
вищого гатунку	45
першого гатунку	20
другого гатунку	10
Побічні продукти:	
висівки та борошно кормове	22,1
кормові зернопродукти	2,2
Усушка	0,7
Всього	100

Економічний ефект від застосування нової робочої поверхні в стадії вібраційного сепарування виражатиметься у підвищенні виробництва борошна різних сортів у зв'язку зі зниженням вмісту дрібних домішок на стадії вібраційного сепарування.

Для обґрунтування ефективності проекту виконаємо розрахунки капітальних та поточних витрат [5].

*Розрахунок капітальних витрат.*

До капітальних витрат відносяться вкладені у виробництво нового робочого органу коштів. Капітальні витрати на робочий орган включають:

1. Вартість матеріалів  $C_{\text{мат}} = 680$  грн.
2. Лазерна нарізка отворів опорної поверхні робочого органу на листі 700x1000 мм.  $C_{\text{отв}} = 6000$  грн.
3. Нарізка та загиб рифлей змінної висоти  $C_{\text{риф}} = 1000$  грн.
4. Приварювання рифлей до опорної поверхні робочого органу  $C_{\text{пр}} = 650$  грн.

Сума капітальних витрат складе:

$$K_{\text{в}} = C_{\text{мат}} + C_{\text{отв}} + C_{\text{риф}} + C_{\text{пр}} \quad (5.1)$$

$$K_{\text{в}} = 680 + 6000 + 1000 + 650 = 8330 \text{ грн}$$

*Розрахунок об'єму виробництва*

Перед розрахунком потрібно розрахувати запланований обсяг випуску продукції за рік:

$$Q = Z \cdot T_{\text{м}} \quad (5.2)$$

де  $Z = 130$  т/ добу – продуктивність лінії;

$T_{\text{м}}$  - плановий робочий період, дні;

$$T_{\text{м}} = 365 - 39 = 326 \text{ дн.}$$

Запланований об'єм випуску  $Q = 130 \cdot 326 = 42380$  т.

*Розрахунок по базовому варіанту*

1. Об'єм виробництва по базовому варіанту
  - борошно вищого гатунку:  $O_{\text{в}}^{\text{б}} = Q \cdot 45\% = 42380 \cdot 45\% = 19071$  т
  - борошно першого гатунку:  $O_{\text{п}}^{\text{б}} = Q \cdot 20\% = 4238 \cdot 20\% = 8476$  т
  - борошно другого гатунку:  $O_{\text{вт}}^{\text{б}} = Q \cdot 10\% = 42380 \cdot 10\% = 4238$  т
  - висівки та борошно кормове:  $O_{\text{о}}^{\text{б}} = Q \cdot 22,1\% = 42380 \cdot 22,1\% = 9365,98$  т
  - кормовий зернопродукт:  $O_{\text{к}}^{\text{б}} = Q \cdot 2,2\% = 42380 \cdot 2,2\% = 932,36$  т

## 2. Товарна продукція по базовому варіанту.

Таблиця 5.2– Вартість 1 т готової продукції

Продукція	Вартість, грн/т
Борошно вищого гатунку	19210
Борошно першого гатунку	17800
Борошно другого гатунку	12750
Висівки та борошно кормове	3500
Кормові зернопродукти	3000

Борошно вищого гатунку

$$ТП_{\text{в}}^{\text{б}} = O_{\text{в}}^{\text{б}} \cdot 19210 = 19071 \cdot 19210 = 366353910 \text{ грн}$$

Борошно першого гатунку

$$ТП_{\text{п}}^{\text{б}} = O_{\text{п}}^{\text{б}} \cdot 17800 = 8476 \cdot 17800 = 150872800 \text{ грн}$$

Борошно другого гатунку

$$ТП_{\text{вт}}^{\text{б}} = O_{\text{вт}}^{\text{б}} \cdot 12750 = 4238 \cdot 12750 = 54034500 \text{ грн}$$

Висівки та борошно кормове

$$ТП_{\text{о}}^{\text{б}} = O_{\text{о}}^{\text{б}} \cdot 3500 = 6200 \cdot 3500 = 21700000 \text{ грн}$$

Кормовий зернопродукт

$$ТП_{\text{к}}^{\text{б}} = O_{\text{к}}^{\text{б}} \cdot 3000 = 932,36 \cdot 3000 = 2797080 \text{ грн}$$

Повна товарна продукція

$$ТП^{\text{б}} = ТП_{\text{в}}^{\text{б}} + ТП_{\text{п}}^{\text{б}} + ТП_{\text{вт}}^{\text{б}} + ТП_{\text{о}}^{\text{б}} + ТП_{\text{к}}^{\text{б}} \quad (5.3)$$

$$ТП^{\text{б}} = 366353910 + 150872800 + 54034500 + 21700000 + 2797080 = 595758290 \text{ грн}$$

## 3. Розрахунок повної собівартості продукції по базовому варіанту.

Таблиця 5.3 – Собівартість виробництва 1 т готової продукції

Продукція	Вартість, грн/т
Борошно вищого гатунку	17080
Борошно першого гатунку	16500
Борошно другого гатунку	11650
Висівки та борошно кормове	2500
Кормові зернопродукти	2100

Борошно вищого сорту

$$C_B^b = O_B^b \cdot 17080 = 19071 \cdot 17080 = 325732680 \text{ грн}$$

Борошно першого сорту

$$C_{II}^b = O_{II}^b \cdot 16500 = 8476 \cdot 16500 = 13985400 \text{ грн}$$

Борошно другого сорту

$$C_{BT}^b = O_{BT}^b \cdot 11650 = 4238 \cdot 11650 = 49372700 \text{ грн}$$

Висівки та борошно кормове

$$C_O^b = O_O^b \cdot 2500 = 5270 \cdot 2500 = 13175000 \text{ грн}$$

Кормовий зернопродукт

$$C_K^b = O_K^b \cdot 2100 = 5100 \cdot 2100 = 10710000 \text{ грн}$$

Повна собівартість

$$C^b = C_B^b + C_{II}^b + C_{BT}^b + C_O^b + C_K^b \quad (5.4)$$

$$C^b = 325732680 + 13985400 + 49372700 + 13175000 + 10710000 = 412975780 \text{ грн}$$

4. Прибуток по базовому варіанту

$$\Pi^b = T\Pi^b - C^b \quad (5.5)$$

$$\Pi^b = 595758290 - 412975780 = 182782510 \text{ грн}$$

### Розрахунок по базовому варіанту

Розрахунок приросту борошна за рахунок зниження дрібних домішок після встановлення нового робочого органу.

Засміченість зерна, що подається в зерноочисне відділення, повинна становити 5% дрібних домішок, серед яких вміст бур'янистих домішок не повинен перевищувати 1%, а вміст зернової домішки – 4%.

Розроблений робочий орган забезпечує 80% очищення від дрібних домішок.

*Очищення від бур'янистих домішок.*

Сучасне зерноочисне обладнання забезпечує 60% очищення від бур'янистих домішок. Дану величину вважатимемо базисною.

Розрахуємо вміст бур'янистих домішок після стадії вібросепарування.

За базовим варіантом:

$$СП_1 = 1\% - 1\% \cdot 0,6 = 0,4\%$$

За проєктованим варіантом:

$$СП_2 = 1\% - 1\% \cdot 0,8 = 0,2\%$$

Вихід борошна і висівок за рахунок зниження кормового зернопродукту:

$$(СП_1 - СП_2) \cdot (+1) = (0,4\% - 0,2\%) \cdot (+1) = 0,2\%$$

В результаті помелу буде перероблятися наступна кількість зерна

$$75\% + 22,1\% = 96,1\%$$

Буде досягнутий наступний приріст виробництва:

- борошна вищого гатунку  $\frac{0,2\% \cdot 45\%}{96,1\%} = + 0,094\%$  ;
- борошно першого сорту  $\frac{0,2\% \cdot 20\%}{96,1\%} = + 0,041\%$  ;
- борошно другого сорту  $\frac{0,2\% \cdot 10\%}{96,1\%} = + 0,02\%$  ;
- висівки  $\frac{0,2\% \cdot 22,1\%}{96,1\%} = + 0,094\%$

Кормовий зернопродукт зменшиться на 0,2%.

*Очищення від зернової домішки.*

Сучасне зерноочисне обладнання забезпечує 55% очищення від зернової домішки. Дану величину вважатимемо базисною.

Розрахуємо вміст зернової домішки після вібросепарування.

За базовим варіантом:

$$ЗП_1 = 4\% - 4\% \cdot 0,55 = 1,8\%$$

За проєктованим варіантом:

$$ЗП_2 = 4\% - 4\% \cdot 0,8 = 0,8\%$$

1. Вихід борошна і висівок за рахунок зниження кормового зернопродукту:

$$(ЗП_1 - ЗП_2) \cdot (+0,35) = (1,8\% - 0,8\%) \cdot (+0,35) = 0,35\%$$

Буде досягнуто наступний приріст виробництва:

- борошно вищого гатунку  $\frac{0,35\% \cdot 45\%}{96,1\%} = + 0,136\%$  ;
- борошно першого гатунку  $\frac{0,35\% \cdot 20\%}{96,1\%} = + 0,072\%$  ;

- борошно другого ґатунку  $\frac{0,35\% \cdot 10\%}{96,1\%} = +0,036\%$  ;
- висівки  $\frac{0,35\% \cdot 22,1\%}{96,1\%} = +0,079\%$

Кормовий зернопродукт зменшився на 0,35%.

2. Перехід борошна при помелу у висівки

$$(ЗП_1 - ЗП_2) \cdot (+0,18) = (1,8\% - 0,8\%) \cdot (+0,18) = +0,18\% - \text{вихід борошна}$$

за рахунок зниження кількості висівок і кормового борошна.

Буде досягнуто наступний приріст виробництва:

- борошно вищого ґатунку  $\frac{0,18\% \cdot 45\%}{75\%} = +0,108\%$  ;
- борошно першого ґатунку  $\frac{0,18\% \cdot 20\%}{75\%} = +0,048\%$  ;
- борошно другого ґатунку  $\frac{0,18\% \cdot 10\%}{75\%} = +0,024\%$  ;
- висівки  $\frac{0,35\% \cdot 22,1\%}{96,1\%} = +0,079\%$

Висівки зменшуються на 0,18%.

Підсумовуючи отримані результати, отримаєм зміни виробництва наступних продуктів помелу:

- борошно вищого ґатунку  
 $45\% + 0,094\% + 0,163\% + 0,108\% = 45,365\%$ ;
- борошно першого сорту  
 $20\% + 0,041\% + 0,072\% + 0,04\% = 20,161\%$ ;
- борошно другого ґатунку  
 $10\% + 0,02\% + 0,036\% + 0,24\% = 10,08\%$ ;
- висівки  
 $22,1\% + 0,045\% + 0,079\% - 0,18\% = 22,044\%$ ;
- кормовий зернопродукт  
 $2,2\% - 0,2\% - 0,35\% = 1,65\%$

2. Об'єм виробництва борошна і висівок по проектуваному варіанту

- борошно вищого сорту:  $O_B^b = Q \cdot 45,365\% = 19225,687 \text{ т}$
- борошно першого сорту:  $O_{II}^b = Q \cdot 20,161\% = 8544,232 \text{ т}$

- борошно другого сорту:  $O_{\text{BT}}^{\text{б}} = Q \cdot 10,08\% = 4271,904 \text{ т}$

- висівки та борошно кормове:  $O_{\text{о}}^{\text{б}} = Q \cdot 22,044\% = 9\,342,247 \text{ т}$

- кормовий зернопродукт:  $O_{\text{к}}^{\text{б}} = Q \cdot 1,65\% = 699,27 \text{ т}$

### 3. Товарна продукція за проєктованим варіантом.

Борошно вищого ґатунку:

$$\text{ТП}_{\text{в}}^{\text{б}} = O_{\text{в}}^{\text{п}} \cdot 19210 = 19225,687 \cdot 19210 = 177212250 \text{ грн}$$

Борошно першого ґатунку:

$$\text{ТП}_{\text{п}}^{\text{б}} = O_{\text{п}}^{\text{п}} \cdot 17800 = 8544,232 \cdot 17800 = 152083200 \text{ грн}$$

Борошно другого ґатунку:

$$\text{ТП}_{\text{BT}}^{\text{б}} = O_{\text{BT}}^{\text{п}} \cdot 12750 = 4271,904 \cdot 12750 = 54468000 \text{ грн}$$

Висівки та борошно кормове:

$$\text{ТП}_{\text{о}}^{\text{б}} = O_{\text{о}}^{\text{п}} \cdot 3500 = 9342,247 \cdot 3500 = 32697000 \text{ грн}$$

Кормовий зернопродукт:

$$\text{ТП}_{\text{к}}^{\text{б}} = O_{\text{к}}^{\text{п}} \cdot 3000 = 699,27 \cdot 3000 = 2097810 \text{ грн}$$

Повна товарна продукція:

$$\text{ТП}^{\text{п}} = \text{ТП}_{\text{в}}^{\text{п}} + \text{ТП}_{\text{п}}^{\text{п}} + \text{ТП}_{\text{BT}}^{\text{п}} + \text{ТП}_{\text{о}}^{\text{п}} + \text{ТП}_{\text{к}}^{\text{п}}$$

$$\text{ТП}^{\text{п}} = 177212250 + 152083200 + 54468000 + 32697000 + 2097810 =$$

$$418558260 \text{ грн} = 418558,26 \text{ тис. грн}$$

43. Розрахунок повної собівартості продукції, яка випускається по проєктованому варіанту

4.1. Щорічна ставка амортизації з урахуванням закладеного терміну служби 5 років:  $100\% / 5 = 20\%$

Амортизація, яка нараховується на робочу поверхню із розрахунку терміну служби 5 років:  $A = K_{\text{в}} \cdot 20\% = 8330 \cdot 20\% = 1666 \text{ грн}$

Амортизація із розрахунку на тону продукції

$$A_{\text{т}} = \frac{1666}{42380} = 0,04 \text{ грн/т}$$

#### 4.2. З урахуванням амортизаційних відрахувань

Борошно вищого гатунку

$$C_B^п = O_B^п \cdot (17080 + 0,04) = 19225,687 \cdot 1708,04 = 32838242,4 \text{ грн}$$

Борошно першого гатунку

$$C_п^п = O_п^п \cdot (23365 + 0,04) = 8544,232 \cdot 23365,04 = 199636322,4 \text{ грн}$$

Борошно другого гатунку

$$C_{BT}^п = O_{BT}^п \cdot (23280 + 0,04) = 4271,904 \cdot 23280,04 = 99450096 \text{ грн}$$

Висівки та борошно кормове

$$C_o^п = O_o^п \cdot (4190 + 0,04) = 9342,247 \cdot 4190,04 = 39144388,6 \text{ грн}$$

Кормовий зернопродукт

$$C_k^п = O_k^п \cdot (4800 + 0,04) = 699,27 \cdot 4800,04 = 3356524 \text{ грн}$$

Повна собівартість

$$C^п = C_B^п + C_п^п + C_{BT}^п + C_o^п + C_k^п$$

$$C^п = 32838242,4 + 199636322,4 + 99450096 + 39144388,6 + 3356524 = \\ = 374425573,4 \text{ грн} = 374425,64 \text{ тис. грн}$$

#### 5. Прибуток по проектуваному варіанту

$$\Pi^п = T\Pi^п - C^п = 418558,26 - 374425,64 = 44132,62 \text{ тис. грн}$$

#### Економічний ефект

1 Збільшення прибутку складе:

$$\Pi = \Pi^п - \Pi^o = 44132,62 - 18278,25 = 25854,37 \text{ тис. грн}$$

Отже, розрахункове збільшення прибутку при впровадженні вібросепаратора з розробленим робочим органом у технологічну лінію з помелу борошна продуктивністю 130 т/добу становитиме 25854,37 тис. грн на рік.

## ВИСНОВКИ

Сучасне технологічне обладнання, що застосовується для очищення зерна пшениці від домішок має такі недоліки:

- недостатньо висока у зв'язку зі збільшеними вимогами до якості продукції технологічна ефективність очищення від дрібних домішок. Для підвищення ефективності процесу необхідно створити сприятливі умови для їх просіювання через ситову поверхню;

- легкі домішки, які видаляють повітряним потоком, рівномірно розподілені у шарі зерноsumіші, що знижує ефективність очищення. Для підвищення ефективності процесу необхідно забезпечити попереднє розшарування зерноsumіші перед подачею її у вертикальний пневмоканал.

Вирішити ці проблеми дозволить інтенсифікація процесу самосортування.

2. Підвищення ступеня поділу компонентів при зворотно-поступальних коливаннях опорної поверхні може бути забезпечено збільшенням шорсткості, що сприятиме інтенсивному самосортуванню та пошаровому руху.

1. На основі проведених теоретичних досліджень запропоновано та обґрунтовано нова динамічна модель вібраційного переміщення частинок нижнього шару між суміжними рифлями при зворотно-поступальних коливаннях опорної поверхні.

4. Теоретично визначено можливі режими руху частки нижнього шару між суміжними рифлями за період коливань опорної поверхні:

- двостороннє ковзання частинки з миттєвими зупинками без пауз;
- двостороннє ковзання частинки з паузами;
- двостороннє ковзання частинки з паузою та миттєвою зупинкою;
- одностороннє ковзання частки.

5. Для можливих режимів одержано вирішення основного завдання теорії вібраційного переміщення - визначення середньої швидкості частинок нижнього шару між суміжними рифлями опорної поверхні

6. Визначено раціональний для здійснення процесів сепарування режим руху частинок нижнього шару - двостороннє ковзання з миттєвими зупинками без пауз.

7. Визначено вплив числа повних коливань за хвилину  $n$ , амплітуди  $A$  коливань опорної поверхні, кутів  $\alpha$  нахилу опорної поверхні,  $\beta$  нахилу коливань і встановлення рифлів на середню швидкість частинок нижнього шару.

8. Експериментально визначено, що «ніж», встановлений на живильному лотку пневмосепаратора при підготовці зернової суміші до очищення від легких домішок, дозволить виділити верхній шар зерноsumіші з високою концентрацією легких домішок та знизити питоме навантаження на пневмоканал.

9. Експериментально визначено області раціональних кінематичних та настановних параметрів процесів сепарування. Підвищення ефективності процесу занурення дрібних домішок досягається шляхом зменшення частоти при відповідному збільшенні амплітуди коливань, процесу спливання легких домішок - збільшення частоти та зменшення амплітуди.

10. Експериментально визначено величину питомого навантаження на опорну поверхню при раціональних параметрах процесу, при якій усі легкі домішки в межах встановленої похибки потрапляють у верхній шар зерноsumіші –  $q = 70$  кг/см-год. У вертикальний пневмоканал у цьому випадку подаватиметься 19% зерноsumіші.

11. Експериментально визначено значення питомого навантаження на робочу поверхню  $q = 95$  кг/см-год, при якій ефективність процесу становила б більше 80%

12. Розроблено робочий орган вібросепаратора при очищенні зерна від дрібних домішок та живильний лоток пневмосепаратора, що дозволяє при продуктивності 7 т/год знизити навантаження на пневмоканал на 47% та підвищити ефективність його роботи.

13. Розрахункове збільшення прибутку при впровадженні вібросепаратора з розробленим робочим органом у технологічну лінію з помелу борошна продуктивністю 130 т/добу становитиме 25854,37 тис.грн на рік.